

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет	Інженерно-фізичний
Кафедра	Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	132 МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО
Освітньо-професійна програма	Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів
Вибірковий блок	Матеріалознавство композитів і покриттів

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

В.о. завідувача кафедри

Мазур В. І.

(прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

“ ”

_____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію магістранту

Ковалю Ярославу Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема дисертації: «Структура та властивості спрямовано закристалізованих сплавів системи B_4C-NbB_2-SiC »
2. Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент, Богомол Ю.І., затверджений наказом по університету від 12 листопада 2019 року № 3890-с.
3. Строк подання дисертації: 18.12.2019.
4. Вихідні дані до дисертації: Аналіз сучасного стану виробництва матеріалів на основі карбіду бору та впровадження нових методів спікання повинно дати можливість сформулювати шляхи отримання виробів з сплавів потрібних систем. Технологічні процеси повинні забезпечувати певний рівень найважливіших властивостей даних сплавів, що включають в себе B_4C , що залежать від складу вихідного порошку, а також його структури, яка формується

у процесі спікання.

Організаційно-економічні засади повинні забезпечувати оцінку науково-технічного ефекту не нижчий за 5.

Охорона праці та безпека в надзвичайній ситуації повинні відповідати нормативним вимогам.

5. Зміст пояснювальної записки:

а) провести аналіз сучасного стану теорії і технології отримання сплавів систем типу $B_4C-Me^{IV}B_2-SiC$ та розробити технологічну схему для виробництва даних матеріалів методом зонної плавки;

б) отримати зразки методом зонної плавки та дослідити їх структуру, фазовий склад і механічні властивості;

в) визначити шкідливі та небезпечні виробничі фактори;

г) розробити заходи для попередження впливу шкідливих та небезпечних виробничих факторів;

д) провести розрахунок кількості електроенергії, необхідної для проведення експериментальної частини;

е) обґрунтувати необхідну кількість робітників, розмір фонду їх заробітної плати, визначити показники продуктивності праці;

ж) довести ефективність дисертації та розробити стартап-проект.

6. Перелік графічного матеріалу:

а) технологічна схема отримання сплавів системи B_4C-NbB_2-SiC методом зонної плавки;

б) макро- та мікроструктури сплавлених зразків з різним вмістом структурних елементів;

в) макромеханічні характеристики одержаних зразків;

г) рентгенограми.

7. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічний розділ	Петренко К. В., к. т. н., доцент		
Розділ охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	Арламов О. Ю., к. т. н., доцент		

8. Дата видачі завдання: 21.09.2018.

РЕФЕРАТ

Робота вміщує: 78с., 20 табл., 27 рис., 30 джерел.

БЕЗТИГЕЛЬНА ЗОННА ПЛАВКА, ДИБОРИД НІОБІЮ, КАРБІД БОРУ, КАРБІД КРЕМНІЮ, ПОТРІЙНА ЕВТЕКТИКА, ТРИФАЗНИЙ СПЛАВ.

Об'єкт дослідження – трифазний сплав B_4C-NbB_2-SiC .

Предмет дослідження – спікання та формування евтектичної структури сплаву B_4C-NbB_2-SiC методом безтигельної зонної плавки.

Мета роботи - дослідження структури та властивостей потрійної системи B_4C-NbB_2-SiC , пошук евтектичного складу та дослідження властивостей отриманого матеріалу.

Методи дослідження – отримання спеченого матеріалу B_4C-NbB_2-SiC методом безтигельної зонної плавки, дослідження структури та механічних властивостей отриманого сплаву, обробка та аналіз отриманих результатів.

Досліджено вплив вмісту компонентів на формування структури спеченого сплаву, встановлено оптимальний склад матеріалу, що забезпечує рівномірну трифазну евтектику.

Дослідження мікромеханічних властивостей показало, що твердість за Віккерсом та тріщиностійкість для композитів B_4C-NbB_2-SiC та B_4C-NbB_2-SiC та B_4C-NbB_2-SiC зростає при зменшенні кількості NbB_2 , як в поздовжньому, так і в поперечному до вирощування напрямках.

РЕФЕРАТ

Работа содержит: 78 с., 20 табл., 27 рис., 30 источников.

БЕЗТИГЕЛЬНАЯ ЗОННАЯ ПЛАВКА, ДИБОРИД НИОБИЯ, КАРБИД БОРА, КАРБИД КРЕМНИЯ, ТРОЙНАЯ ЭВТЕКТИКА, ТРЁХФАЗНЫЙ СПЛАВ.

Объект исследования – трёхфазный сплав $\text{B}_4\text{C-NbB}_2\text{-SiC}$.

Предмет исследования – спекание и формирование эвтектической структуры сплава $\text{B}_4\text{C-NbB}_2\text{-SiC}$ методом безтигельной зонной плавки.

Цель работы – исследование структуры и свойств тройной системы $\text{B}_4\text{C-NbB}_2\text{-SiC}$, поиск эвтектического состава и исследование свойств полученного материала.

Методы исследования - получение испеченного материала $\text{B}_4\text{C-NbB}_2\text{-SiC}$ методом безтигельной зонной плавки, исследования структуры и механических свойств полученного сплава, обработка и анализ полученных результатов.

Исследовано влияние содержания компонентов на формирование структуры испеченного сплава, установлен оптимальный состав материала обеспечивает равномерную трехфазное эвтектику.

Исследования микромеханических свойств показало, что твердость по Виккерсу и трещиностойкость для композитов $\text{B}_4\text{C-NbB}_2\text{-SiC}$ и $\text{B}_4\text{C-NbB}_2\text{-SiC}$ и $\text{B}_4\text{C-NbB}_2\text{-SiC}$ возрастает при уменьшении количества NbB_2 , как в продольном, так и в поперечном к выращиванию направлениях.

ABSTRACT

The work contains: 78 p., 20 tables, 27 figures, 30 sources.

BORONE CARBIDE, FLOATING ZONE MELTING THREE-PHASE ALLOY, NIOBIUM DIOBORIDE THREE COMPONENT EUTECTIC, SILICIUM CARBIDE.

The object of the study is a three-phase alloy B_4C-NbB_2-SiC .

The subject of research is the sintering and formation of the eutectic structure of the alloy B_4C-NbB_2-SiC by the method of floating zone melting.

The purpose of the work is to study the structure and properties of the triple system B_4C-NbB_2-SiC , to find eutectic composition and to study the properties of the material.

Research methods - obtaining the sintered material of B_4C-NbB_2-SiC by the method of floating zone smelting, studying the structure and mechanical properties of the resulting alloy, processing and analysis of the results.

The influence of components on the formation of the structure of the sintered alloy has been investigated, the optimal composition of the material has been established, which ensures uniform three-phase eutectic.

The study of micromechanical properties showed that the Vickers hardness and crack resistance for $50B_4C-20NbB_2-30SiC$ and $49B_4C-18NbB_2-33SiC$ and $50B_4C-15NbB_2-35SiC$ composites increases with decreasing the NbB_2 content.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	8
1.1 Характеристика структурних складових композиту B_4C-NbB_2-SiC	8
1.1.1 Загальна характеристика та властивості B_4C	8
1.1.2 Загальна характеристика та властивості NbB_2	10
1.1.3 Загальна характеристика та властивості SiC	11
1.2 Характеристики подвійних систем.....	13
1.2.1 Фізичні та механічні властивості системи B_4C-SiC	13
1.2.2 Фізичні та механічні властивості систем типу B_4C-NbB_2	16
1.3 Характеристика систем тупи B_4C-MeB_2-SiC	18
1.4 Фізичні властивості евтектичних композиційних матеріалів.....	21
1.4.1 Твердість спрямовано закристалізованих композитів.....	22
1.4.2 Стійкість до окислення спрямовано закристалізованих композитів...23	
1.4.3 Електричні властивості спрямовано закристалізованих композитів...24	
1.5 Висновки та постановка задач дослідження.....	25
2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	27
2.1 Методика отримання зразків	27
2.2 Вихідні матеріали.....	28
2.2.1 Визначення евтектичного складу сплаву	28
2.2.2 Одержання заготовок для вирощування кристалів	30
2.2.3 Пресування стержнів	31
2.2.4 Сушка стержнів	31
2.2.5 Безтигельна зонна плавка.....	31
2.3 Металографічні дослідження.....	33
2.4 Рентгенофазовий аналіз.....	33
2.5 Дослідження мікротвердості та тріщиностійкості сплаву системи B_4C-NbB_2-SiC	34
2.6 Випробування на триточковий згин сплавів.....	35
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....	37
3.1 Дослідження структури композитів.....	37

3.2	Дослідження фазового складу композитів.....	41
3.3	Дослідження мікротвердості та тріщиностійкості.....	41
3.4	Дослідження міцності на згин.....	44
4	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	45
4.1	Безпечність технологічних процесів	45
4.2	Безпечність виробничого обладнання.....	47
4.3	Заходи та засоби безпеки.....	49
5	ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	51
6	ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ.....	53
6.1	Науково-технічна актуальність ДР.....	53
6.2	Мета і завдання дипломної роботи.....	53
6.3	Розрахунок планової собівартості проведення дослідження.....	54
6.3.1	Витрати на оплату праці.....	54
6.3.2	Єдиний соціальний внесок.....	56
7	ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	57
7.1	Витрати на матеріали, що використовуються в роботі.....	57
7.2	Витрати на спеціальне обладнання та прилади.....	57
7.3	Витрати на службові відрядження.....	58
7.4	Інші прямі невраховані витрати.....	58
7.5	Накладні витрати.....	58
7.6	Планова кошторисна вартість магістерської дисертації.....	59
7.7	Економічна ефективність ДР.....	60
7.8	Висновки.....	6
1		
8	РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....	62
8.1	Актуальність.....	62
8.2	Мета і завдання стартап проекту.....	62
8.3	Опис ідеї проекту.....	63
8.3.1	Технологічний аудит ідеї проекту.....	63
8.4	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	64
8.5	Розроблення ринкової стратегії проекту.....	69

8.6 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	70
8.7 Формування системи збуту.....	71
8.8 Висновки до розділу.....	72
ВИСНОВКИ.....	74
CONCLUSIONS.....	75
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	76

ВСТУП

На сьогоднішній день досить великий вплив на розвиток аерокосмічної галузі, а також машино- та приладобудування мають високотемпературні композиційні матеріали. Багатьма своїми властивостями — міцністю, ударною в'язкістю, границею витривалості тощо — композити значно перевищують традиційні матеріали, завдяки чому потреби суспільства в них і взагалі у нових матеріалах безперервно зростають.

Композиційні матеріали, що складаються зі складових, які мають різні механічні та теплові характеристики можуть знайти застосування у вигляді зносостійких, корозійно та хімічно стійких деталей, які можуть працювати при високих температурах, в різних агресивних середовищах а також під дією статичних та динамічних навантажень.

Новітні дослідження базуються на виготовленні та дослідженні композитів, що в своїй основі мають B_4C — один з найтвердіших матеріалів (після алмазу та BN_c), що в поєднанні з низькою густиною ($2,52 \text{ г/см}^3$) та високими механічними характеристиками робить його область застосування досить варіативною — від абразивних та шліфувальних матеріалів до захисних пластин бронежилетів та елементів ядерних реакторів [1].

Легування карбіду бору високотемпературними та сполуками, що мають високі фізико-механічні характеристики (бориди, карбіди, силіциди) може призвести до розробки композитів, що будуть мати вищі термодинамічні та механічні характеристики ніж в чистого B_4C .

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Характеристика структурних складових композиту B_4C-NbB_2-SiC

1.1.1 Загальна характеристика та властивості B_4C

У групі найважливіших неметалевих твердих матеріалів (глинозем, карбід кремнію, нітрид кремнію, алмаз або кубічний нітрид бору) карбід бору займає одне з провідних місць.

Кристалічна структура карбиду бору відома вже давно. Решітка належить до просторової групи $D_{3d}^5 - R\bar{3}m$. Ромбоєдрична елементарна комірка містить 15 атомів, що відповідають $B_{12}C_3$ (рис. 1.1). Останні дані заперечили ці результати. Дослідження ядерного магнітного резонансу (ЯМР), виконані на кристалі стехіометрії, близького до $B_{12}C_3$, показали, що центральне положення в $C - C - C$ - ланцюзі частково зайнято бором. За допомогою ІЧ-абсорбційної спектроскопії Бечер і Тевенот підтвердили існування ланцюга $C-B-C$ у сполуках, таких як B_4C і $B_{5,52}C$ [2].

Карбіди бору складаються з 12-атомних ікосаедричних кластерів, які пов'язані прямими ковалентними зв'язками і через триатомні міжікосаедричні ланцюги. Відомо, що карбіди бору існують як єдина фаза з концентраціями вуглецю від 8,8 до 20 ат. %.

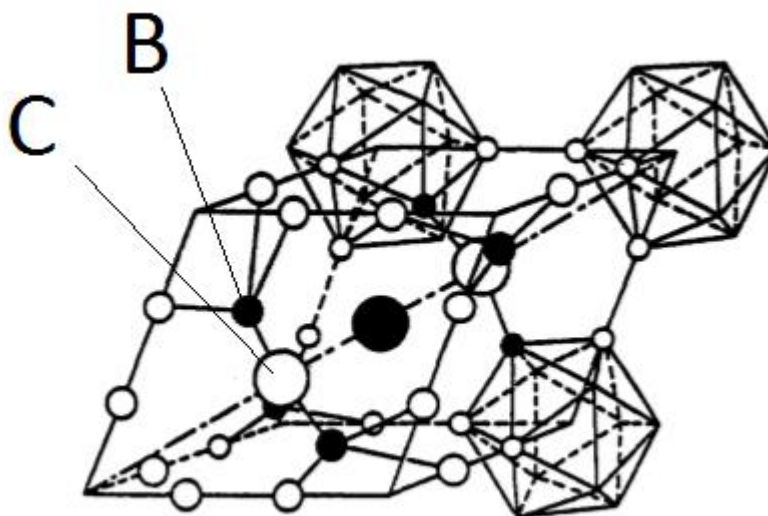


Рисунок 1.1 – Кристалічна гратка B_4C

Щільність B_4C становить $2,52 \text{ г/см}^3$; $B_{13}C_2$ - $2,48 \text{ г/см}^3$, $B_{10,4}C$ - $2,465 \text{ г/см}^3$.
 Коефіцієнт термічного розширення (КТР) $\alpha = 5,73 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (300-1970 K).
 Карбід бору є одним з найтвердіших матеріалів (після алмазу та BN_c).

Твердість по Віккерсу (HV) збільшується із вмістом C у зразках CVD. Значення екстремальної твердості були отримані за допомогою мікрохвильової плазмової депозиції. Відбувається еволюція HV з температурою осадження CVD; мінімум спостерігався за 1373K, що відповідає мікроструктурі з максимальним розміром зерен. Твердість зменшується в присутності вільного графіту в електронно-променевих розплавлених, спечених або CVD-зразках або фазі Al-Si-C в гаряче пресованому карбіді бору [3].

Вимірювання твердості відскоком карбіду бору свідчать про відсутність зниження з температурою до 1300°C . Однак вимірювання при статичному вдавлюванні показують постійне зниження твердості при температурі (рис. 1.2).

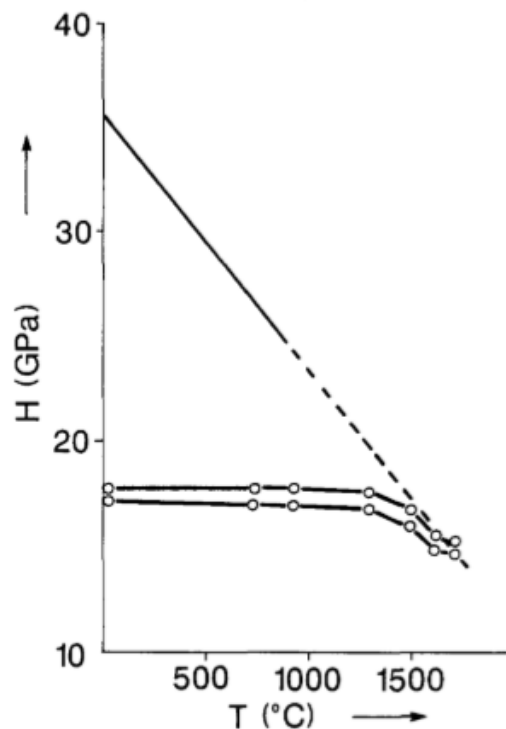


Рисунок 1.2 – Твердість B_4C залежно від температури

Основні механічні характеристики зведені в таблиці 1.1[4].

Таблиця 1.1 – Механічні властивості гарячепресованого та спеченого V_4C

Властивість	Гарячепресований V_4C	Спечений V_4C	
		1 мас% C	3 мас% C
Загальний вміст C (мас %)	21,7	22,5	24,8
Пористість (%)	<0,5	<2	<2
Об'ємна щільність (г/см ³)	2,51	2,44	2,46
Середній розмір зерна (мкм)	5	8	7
Міцність на згин (МН/м ²)	480	351	353
Модуль Юнга (ГПа)	441	390	372
Коефіцієнт Пуассона	0,17		
Тріщиностійкість (МПа/м ^{1/2})	3,6	3,3	3,2

Завдяки своїй малій густині та достатньо високим механічним характеристикам (зокрема твердості та міцності) V_4C знайшов своє використання в якості матеріалу для шліфування, його використовують для створення легкої та міцної броні, а також як компонент для розробки високотемпературної кераміки.

1.1.2 Загальна характеристика та властивості NbB_2

Диборид ніобію (NbB_2) є високо ковалентним керамічним матеріалом з гексагональною кристалічною структурою (рис. 1.3). NbB_2 - це високотемпературна кераміка (УНТС) з температурою плавлення 3050°C [5]. Разом з його відносно низькою щільністю ($\sim 6,97$ г/см³) і високою міцністю при високій температурі робить його кандидатом для застосування в аерокосмічній галузі, таких як гіперзвукові літальні або ракетні пускові системи. Це незвичайна кераміка, що володіє відносно високою тепловою та електричною провідністю (питомий електричний опір 25,7 мкОм*см, КТР - $7,7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), який схожий за

властивостями з диборидом титану, диборидом цирконію, диборидом гафнію і тантал диборидом [6].

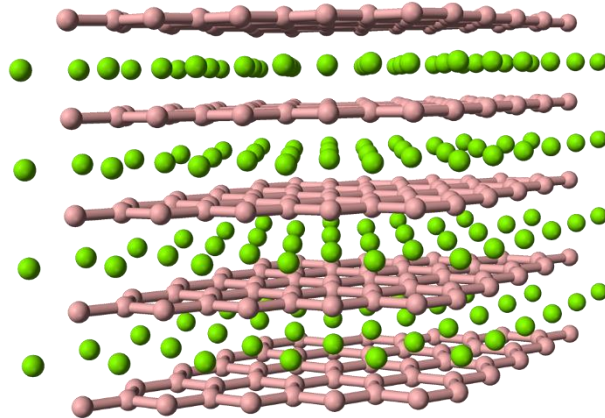


Рисунок 1.3 – кристалічна структура NbB₂

Вироби з NbB₂ зазвичай піддаються гарячому пресуванню [7] або іскровому плазмовому спіканню [8] і потім піддаються механічній обробці. Спікання NbB₂ ускладнюється ковалентним характером матеріалу та наявністю поверхневих оксидів, які збільшують твердість оболонки зерна перед ущільненням під час спікання. Спікання NbB₂ без застосування зовнішнього тиску можливе з добавками, такими як карбід бору і вуглець, які реагують з поверхневими оксидами для збільшення рушійної сили спікання, але механічні властивості погіршуються в порівнянні з гарячим пресуванням NbB₂.

Завдяки своїй міцності при високих температурах (490 МПа при 800°C, 380 МПа при 1800°C) та високому модулю пружності (550 ГПа) [9], даний борид може використовуватись в складі композиційних матеріалів, що будуть витривалими до дії високих робочих температур та навантажень.

1.1.3 Загальна характеристика та властивості SiC

Карбід кремнію є одним із найбільш широко використовуваних матеріалів для використання в конструкційній кераміці. Такі характеристики, як відносно низьке теплове розширення, висока теплопровідність, твердість, стійкість до

стирання та корозії (табл. 1.2), а головне - підтримка пружності при температурах до 1650°C, призвели до широкого розширення діапазону його використання [10].

Характеристики модуля пружності та теплового розширення задаються характеристиками самого кристала SiC, а теплопровідність або теплова дифузія карбідів кремнію має тенденцію бути значно вищою, ніж у інших конструкційних керамічних матеріалів. Поєднання високого модуля пружності і помірного коефіцієнта теплового розширення робить SiC схильним до пошкодження термічним ударом. Стійкість до теплового удару значно нижче, ніж у нітриду кремнію, але вище, ніж у конструкційної кераміки з діоксиду цирконію. Стійкість перед тепловим ударом також дуже залежить від умов застосування. Наприклад, дуже швидкі зміни температури можуть привести до переваги Si₃N₄ над SiC, тоді як для помірних темпів зміни температури висока теплопровідність SiC може призвести до кращої продуктивності.

Таблиця 1.2 – Фізико-механічні властивості SiC

Властивість	Значення
Густина	3,1 г/см ³
Міцність на згин	550 МПа
Модуль пружності	410 ГПа
Коефіцієнт Пуассона	0,14
Міцність на стиск	3900 МПа
Твердість	2800 кг/мм ²
Тріщиностійкість	4,6 МПа/м ^{1/2}
Максимальна робоча температура (без навантажень)	1650°C
Коефіцієнт теплопровідності	120 Вт/(м·К)
КТР	4*10 ⁻⁶ °C ⁻¹
Питома теплоємність	750 Дж/(кг*К)

Кристалічна структура SiC зображена на рисунку 1.4.

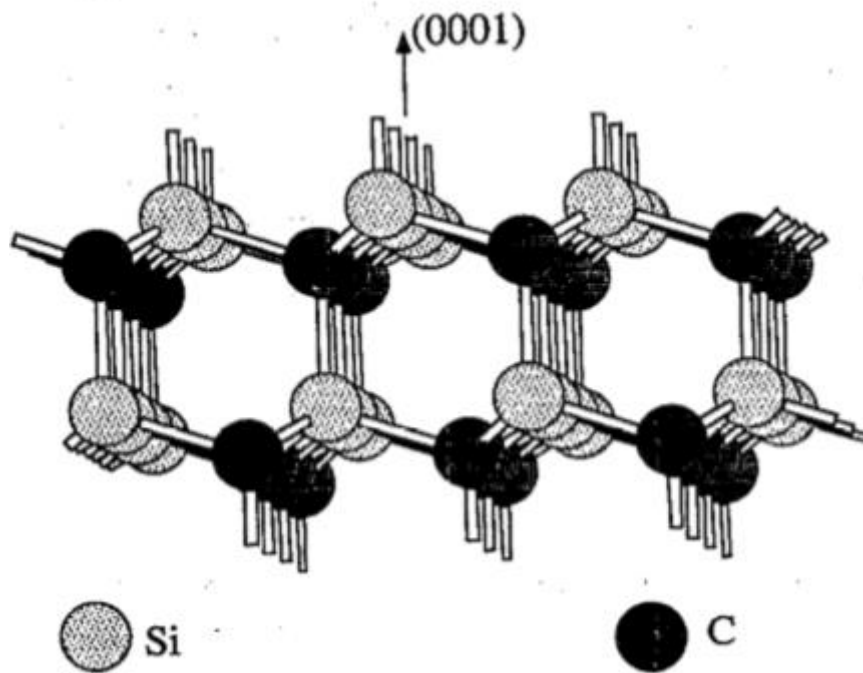


Рисунок 1.4 – Кристалічна структура карбіду кремнію

Карбід кремнію використовується для виготовлення деталей, що працюють на зношування при невисоких температурах, наприклад, піскоструминні форсунки, ущільнення водяних насосів для автомобілів, підшипники, компоненти насоса та екструзійні штампи, що потребують високу твердість, стійкість до зношування та корозійну стійкість карбіду кремнію [11].

1.2 Характеристики подвійних систем

1.2.1 Фізичні та механічні властивості системи B_4C - SiC

B_4C широко використовується завдяки унікальному набору властивостей, включаючи надзвичайно високу твердість, низьку щільність, хорошу хімічну стабільність і здатність до поглинання нейтронів. Однак низька міцність і в'язкість руйнування B_4C є основними перешкодами для його застосування. Крім того, через дуже сильні ковалентні зв'язки, високу стійкість до ковзання зерна та відсутність пластичності, ущільнення B_4C надзвичайно складне і дороге. Розроблено кілька стратегій для подолання цих недоліків, таких як зменшення

розміру частинок і об'єднання його з іншими матеріали для формування гібридної структури. Останні дослідження показали, що неупорядкованість перетворення під час спікання може сприяти процесу ущільнення, яке робить можливим отримання щільної кераміки B_4C при більш низькій температурі [12].

З метою поліпшення механічних властивостей і зниження температури спікання B_4C , різні матеріали, такі як TiB_2 , CrB_2 , ZrB_2 , SiC , TiC , Al_2O_3 тощо, були змішані з B_4C як домішкова фаза [13]. Серед цих матеріалів SiC є твердим і легким матеріалом з високою міцністю і відносно високою ударною в'язкістю. Так що це один з кращих кандидатів.

Оскільки SiC значно прискорює спікання B_4C , багато робіт присвячено матеріалам системи $SiC - B_4C$, де вміст B_4C був меншим за кілька мольних відсотків. Проте B_4C-SiC композити на основі B_4C не були добре вивчені, оскільки B_4C навряд чи спікається, навіть якщо в якості агломераційної суміші додається відносно велика кількість SiC . Процес плавлення і твердіння може бути застосовним для синтезу повністю щільних композитів. Хоча SiC не плавиться (дисоціює при 3100K) і B_4C має занадто високу температуру плавлення (2700K), суміш B_4C і SiC плавиться конгруентно через природу евтектики B_4C-SiC . Евтектика утворюється при вмісті SiC 53 мол.%(рис.15) [14].

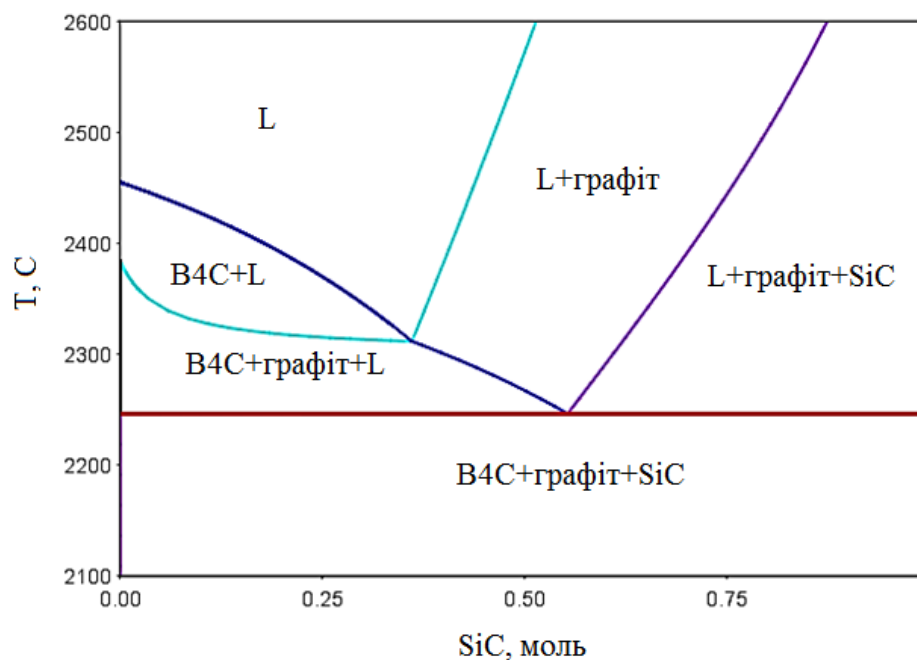


Рисунок 1.5 – Діаграма фазових перетворень системи B_4C-SiC

Отриманий матеріал B_4C -SiC методом зонної плавки має досить високі показники мікротвердості, які зображені на рисунку 1.6.

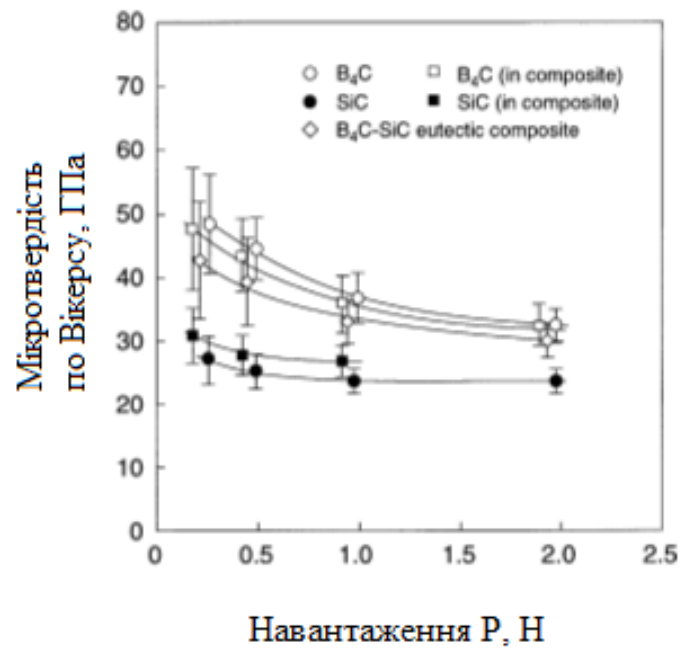


Рисунок 1.6 – Залежність мікротвердості від навантаження системи B_4C - SiC

Структури матеріалу вздовж та поперек росту зображена на рисунку 1.7.

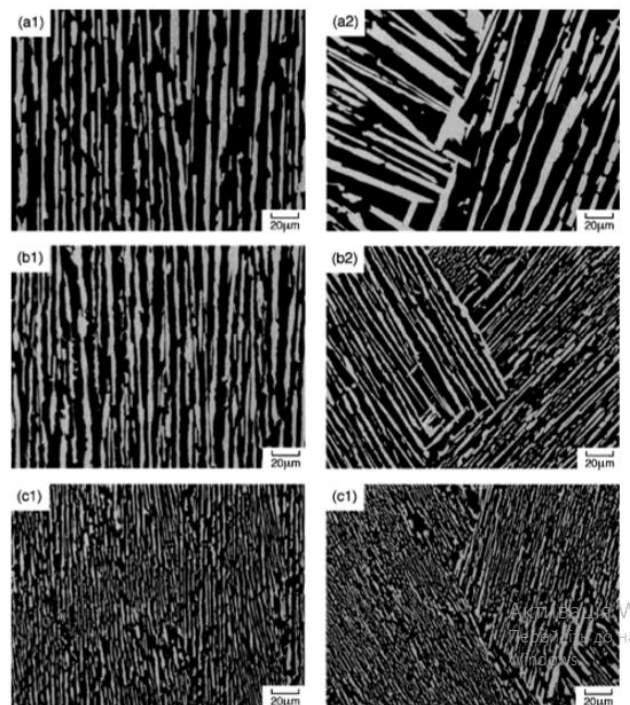


Рисунок 1.7 – Структури композиту B_4C -SiC вздовж (a1, b1, c1) та поперек (a2, b2, c2) фронту кристалізації

Матеріали системи B_4C-SiC є перспективними для використання так, як мають досить високі показники міцності та твердості і можуть знайти застосування в високотемпературних керамічних матеріалах.

1.2.2 Фізичні та механічні властивості систем типу B_4C-NbB_2

Диборид ніобію має перспективу використання в парі з карбідом бору B_4C , так як він має високі показники твердості та хімічної стійкості при тривалому перебуванні у вигляді порошку. Фазову діаграму NbB_2-B_4C представлена на рисунку 1.8, де температура плавлення для евтектичного складу становить $2250\pm 30^\circ C$.

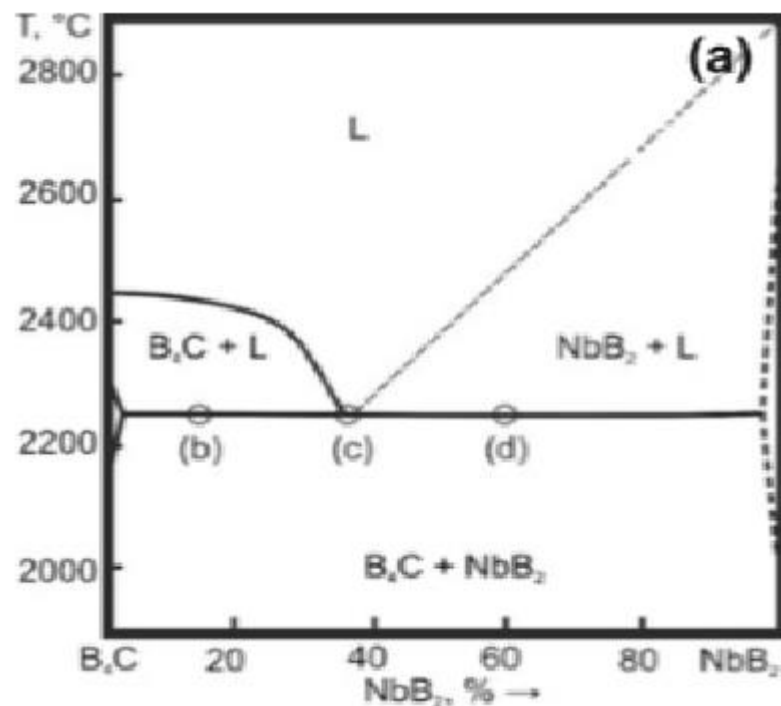


Рисунок 1.8 - Фазова діаграма системи NbB_2-B_4C

Структури евтектичного сплаву NbB_2-B_4C представлені на рисунку 1.9.

Композити з евтектичним складом демонстрували мікротвердості 30–38 ГПа [15]. Подальше збільшення навантаження (1кг, $Hv1.0$) призвело до незначного зниження твердості до 26–30 ГПа.

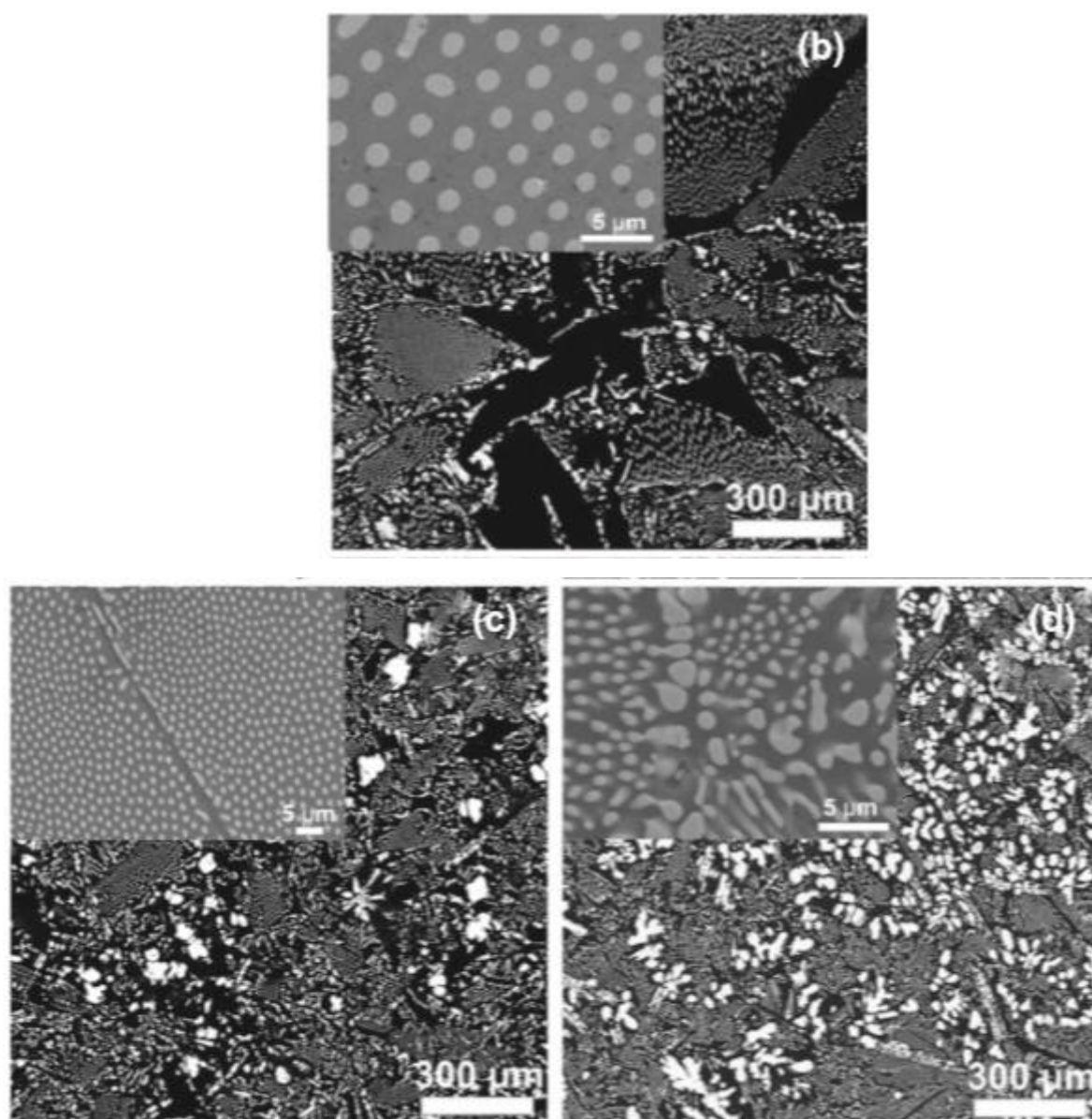


Рисунок 1.9 – Структури композиту з 15(b), 35(c) і 60(d) мол.% NbB₂

Найважливіше, що ударна в'язкість синтезованої на місці евтектики ($5-7 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) була вищою (приблизно 60_{мол}% NbB₂), ніж у окремих фаз, виміряних для доевтектичних і післяевтектичних композицій[16]. Незначне збільшення K_{IC} відзначалося при зменшенні k і у випадку післяевтектичних композицій, що узгоджується з даними, отриманими раніше для різних борид-карбідних композитів. Це робить перспективним використання даного композиту у матеріалах, що працюють при великих навантаженнях та високих температурах.

1.3 Характеристика систем групи B_4C-MeB_2-SiC

Починаючи з другої половини 20-го століття, вогнетривкі безкисневі сполуки все частіше використовуються для розробки матеріалів, що використовуються в екстремальних робочих умовах у зв'язку з вимогами аерокосмічної та ядерної техніки і оборонної промисловості. Специфіка хімічного зв'язку в цій групі речовин забезпечує вогнетривкість, високу твердість, зносостійкість і специфічні електричні характеристики. Порошкова (керамічна) технологія є найбільш прийнятною технологією виготовлення таких матеріалів. Це дає широкі можливості для виготовлення великої групи кераміки з плановими властивостями. Останній прокладається з урахуванням умов експлуатації деталей, виготовлених з нового матеріалу. Такі параметри, як пористість, фазовий склад, розмір зерен, дефектність і стан меж останніх, повинні ретельно контролюватися, оскільки ці властивості відображають структуру матеріалу, виготовленого за цією технологією. Ковалентні карбіди SiC і B_4C широко використовуються при розробці зносостійких матеріалів, здатних зберігати високу твердість до значних температур в різних газових середовищах, включаючи повітря [17]. Ковалентні зв'язки зумовлюють низьку дифузійну рухливість ґратчастих компонентів, що ускладнює виготовлення безшарової високоміцної кераміки. З метою прискорення процесів масопереносу, розроблені способи активації, такі як використання високодисперсних ($d \ll 1 \mu m$) порошків і введення компонентів, що забезпечують спікання в присутності рідкої фази, включаючи спікання карбіду кремнію з оксидом використовуючи добавки [18].

Також застосування добавок у вигляді боридів металів MeB_2 сприяє може сприяти підвищенню механічних характеристик та робочої температури матеріалу.

Нижче наведено значення температури евтектичних перетворень у системах типу $SiC-B_4C-Me^d B_2$ (таблиця 1.3).

Таблиця 1.3 - Склад і евтектична температура в граничних квазібінарних з'єднаннях систем $\text{SiC} - \text{B}_4\text{C} - \text{Me}^{\text{d}}\text{B}_2$

Система	$T_{\text{евт}}, ^\circ\text{C}$	Вміст $\text{Me}^{\text{d}}\text{B}_2$ в евтектиці, мол%
$\text{SiC}-\text{B}_4\text{C}$	2150	57
$\text{SiC}-\text{TiB}_2$	2250	34
$\text{SiC}-\text{ZrB}_2$	2280	28
$\text{SiC}-\text{HfB}_2$	2360	24
$\text{SiC}-\text{VB}_2$	2130	50
$\text{SiC}-\text{NbB}_2$	2247	39
$\text{SiC}-\text{TaB}_2$	2300	35
$\text{SiC}-\text{CrB}_2$	2050	75
$\text{SiC}-\text{W}_2\text{B}_5$	2060	70
$\text{B}_4\text{C}-\text{TiB}_2$	2200	24
$\text{B}_4\text{C}-\text{ZrB}_2$	2280	25
$\text{B}_4\text{C}-\text{HfB}_2$	2377	22
$\text{B}_4\text{C}-\text{VB}_2$	2170	47
$\text{B}_4\text{C}-\text{NbB}_2$	2250	36
$\text{B}_4\text{C}-\text{TaB}_2$	2370	32
$\text{B}_4\text{C}-\text{CrB}_2$	2147	70
$\text{B}_4\text{C}-\text{W}_2\text{B}_5$	2130	60

Знаходження області $\text{SiC}-\text{B}_4\text{C}-\text{Me}^{\text{d}}\text{B}_2$ на діаграмі $\text{B}-\text{C}-\text{Si}-\text{Me}^{\text{d}}$ показано на рисунку 1.10.

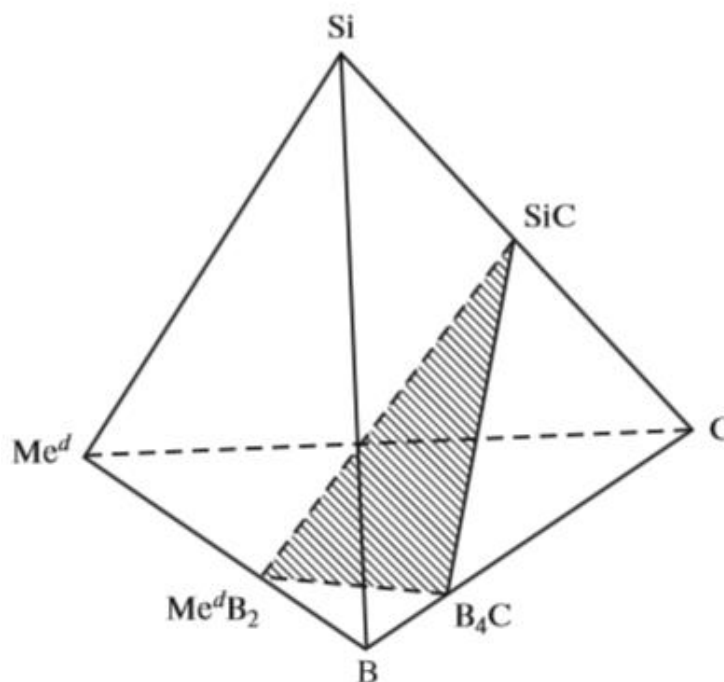


Рисунок 1.10 - SiC – B₄C – Me^dB₂ з'єднання в об'ємі фазової діаграми системи B – C – Si – Me^d.

Температури плавлення потрійних евтектик та вміст бориду металу наведені в таблиці 1.4 та представлені на рисунку 1.11 [19].

Таблиця 1.4 – Точки плавлення потрійної евтектики (T_{евт}) і концентрації диборидів в евтектиці (X_{евт}) в системах SiC – B₄C – Me^dB₂.

Диборид	T _{пл} ^{Me^dB₂} , °C	T _{евт} , °C	X _{евт} , мол %
CrB ₂	2200	1959	61,6
VB ₂	2750	1874	42,8
NbB ₂	3000	2024	29
TaB ₂	3100	2116	25,5
TiB ₂	3225	1945	17,7
ZrB ₂	3250	2010	15,5
HfB ₂	3350	2110	14
W ₂ B ₅	2350	1926	56,3

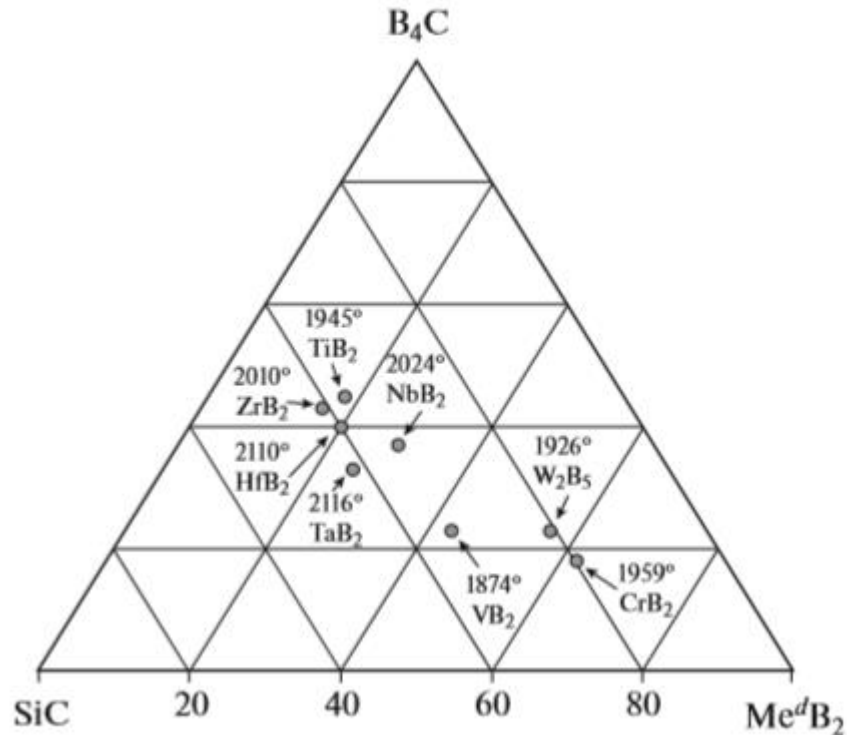


Рисунок 1.11 - Розраховані композиції (мол. %) і точки плавлення ($^{\circ}\text{C}$) потрійної евтектики в узагальненій фазовій діаграмі систем $\text{SiC} - \text{B}_4\text{C} - \text{Me}^d\text{B}_2$.

Параметри аналізованих систем дозволяють використовувати стандартне пічне обладнання та імпульсні процедури нагрівання та ущільнення залежно від запланованих властивостей, структури та областей застосування при розробці високотемпературної кераміки. Інформація про структуру фазових діаграм систем $\text{SiC} - \text{B}_4\text{C} - \text{Me}^d\text{B}_2$ є фізико-хімічною основою для розробки широкого спектра конструктивних і функціональних керамічних матеріалів і покриттів, застосування яких можливе до $t \approx 1500^{\circ}\text{C}$.

1.4 Фізичні властивості евтектичних композиційних матеріалів

Фізичні та механічні властивості спрямовано закристалізованих евтектичних сплавів дещо відрізняються від сплавів, отриманих традиційними методами порошкової металургії. Завдяки тому, що під час плавлення утворюється матеріал, що має високу щільність та малу питому енергію між фазами, такі сплави, зазвичай, мають досить високу твердість, міцність та

зносостійкість [20]. Регулювання режиму та швидкості плавлення заготовки дає змогу впливати на кінцеву структуру матеріалу і, відповідно, на його фізико-механічні характеристики.

1.4.1 Твердість спрямовано закристалізованих композитів

Типовими методами вимірювання твердості такого типу композитів є випробування на вдавлювання по Вікерсу та Кнупу. Твердість даних матеріалів залежить від методу дослідження та від прикладеного навантаження, тому дані, отримані після вимірювань повинні узгоджуватись з типом та режимом навантаження [21].

Найбільшу твердість мають композити, що мають в своєму складі B_4C . Отримані значення твердості для матеріалу B_4C-TiB_2 ($31,4 \pm 2,1$ ГПа при навантаженні 10 Н) [22] є значно вищими, за відповідні для спрямовано закристалізованої оксидної кераміки (Al_2O_3-YSZ : 18–20 ГПа; Al_2O_3-YAG [23]: 14–16 ГПа). Однак, твердість має пряму залежність від мікроструктури матеріалу, тому склад композиту та режим спікання має визначальний вплив на дану характеристику. Загалом, твердість на вдавлювання боридних та карбідних спрямовано закристалізованих евтектичних сплавів зазвичай збільшується зі збільшенням швидкості кристалізації або зменшенням відстані між пластинами та волокнами. Так, наприклад, в роботі [24] вказано, що при вимірюванні твердості закристалізованого евтектичного сплаву B_4C-SiC , значення збільшується при збільшенні швидкості кристалізації та при зменшенні міжпластинчастої відстані. Проте в літературі [25] вказано, що твердість за Кнупом при навантаженні 1,96Н, не залежить від мікроструктурного масштабу. Такі розбіжності в висновках, скоріш за все, викликані різними відстанями між пластинами (2–4 мкм та 4–12 мкм відповідно).

У деяких випадках зменшення мікроструктурного масштабу може призвести до падіння значення твердості, що пов'язано з нестабільним ростом евтектики та утворенням заевтектичної структури.

Бориди перехідних металів та металів d-групи та карбіди, завдяки своїй високій твердості, також мають високі значення зносостійкості. Тому, на відміну від монолітних матеріалів, велика міжфазна область у спрямовано закристалізованих композитах дає можливість розробляти евтектичні сплави, які будуть мати високі значення жорсткості та зносостійкості [26].

1.4.2 Стійкість до окислення спрямовано закристалізованих композитів

Завдяки високим температурам плавлення, бориди та карбіди вважаються надвисокотемпературною керамікою, але досить важливу роль відіграє середовище, в якому перебувають дані матеріали при високих температурах. Вони мають досить низьку хімічну стабільність та легко піддаються дії кисню, вологості та інших факторів. Тому одним із варіантів усунення даної проблеми є утворення тонкого шару оксиду кремнію на поверхні сплаву для забезпечення стійкості до окислення [27].

Наразі відомо, що одним із найкращих вирішень проблеми високотемпературного окиснення є розробка матеріалів, що матимуть в своїй основі карбід кремнію SiC. Дослідження системи B₄C-SiC показали, що хоч і при відносно невисоких температурах, але в середовищі чистого кисню, відбувається незначний приріст маси (рис. 1.12), що показує позитивну дію SiC на хімічну стійкість композиту [23].

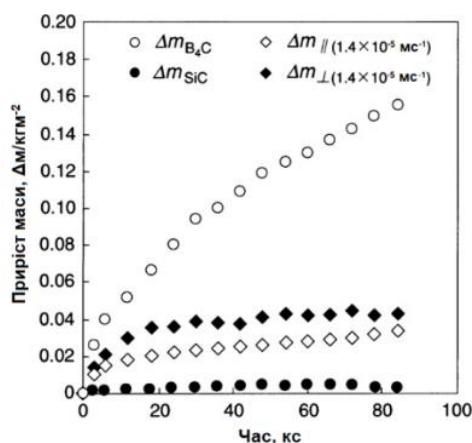


Рисунок 1.12 – Спрямовано закристалізований евтектичний сплав B_4C - SiC при температурі 750 °C в середовищі кисню

На теперішній час існує досить публікацій, які описують процеси окиснення високотемпературних композиційних матеріалів, тому питання впливу добавок на основі Si та інших елементів залишається відкритим та маловивченим.

1.4.3 Електричні властивості спрямовано закристалізованих композитів

Незважаючи на те, що механічні властивості були основним напрямком досліджень боридних та карбідних спрямовано закристалізованих евтектик, деякі дослідження дозволили оцінити їх електричні та термічні властивості. Оскільки як електро-, так і теплопередача залежать від мікроструктури та можливості розсіювання на границі розділу між фазами в композиційних матеріалах, мікроструктурне вирівнювання та висока щільність на границі розділу між фазами, властиві спрямовано закристалізованим сплавам, можуть призвести до унікальних і, можливо, адаптованих властивостей переносу. Крім того, через велику анізотропію мікроструктури і сильну кристалографічну текстуру в спрямовано закристалізованих евтектичних сплавах, властивості переносу також змінюються в залежності від орієнтації зразка.

Електропровідність спрямовано закристалізованого сплаву B_4C - SiC залежить від температури і зменшується зі збільшенням температури в інтервалі температур 343-1073 К [23], що відповідає напівпровідниковим складовим фаз.

У цьому випадку мікроструктура є пластинчастою, але в провідності все ще є деяка анізотропія. Для прогнозування вимірюваних провідностей досить добре працює правило сумішей, що свідчить про те, що фаза B_4C вищої провідності є безперервною вздовж напрямку росту, і що розсіювання на границі розділу між фазами не відіграє суттєвої ролі у питомому опорі зразку.

Виходячи з поєднання електричних, механічних та термічних властивостей, спрямовано закристалізовані евтектичні композиційні матеріали на основі B_4C , SiC та боридів металів можуть бути потенційними матеріалами для застосування у ракетній та ядерній техніці, в якості матеріалів, що мають низький КТР, високу корозійну стійкість та відмінні механічні властивості.

1.5 Висновки та постановка задач дослідження

Технічний прогрес, розробка та модернізація нових методів досліджень та відкриття нових властивостей композиційних матеріалів спонукає матеріалознавців до створення нових матеріалів з необхідними властивостями, такими як підвищена міцність, твердість, жаро- та тріщиностійкість.

Спрямовано закристалізовані евтектичні сплави на основі карбідів та боридів показують значно вищі фізико-механічні характеристики, ніж відповідні їм композити, що виготовлені традиційними методами порошкової металургії. Сплави групи $\text{B}_4\text{C}-\text{Me}^{\text{IV}}\text{B}_2$ мають високі значення твердості та зносостійкості а також відносно низькі значення щільності, що дозволяє використання їх у військовій техніці та пластинах для бронезилов. Також спрямовано закристалізовані евтектичні сплави на основі боридів та карбідів показують досить високу зносостійкість та міцність під впливом високих температур ($>1400^\circ\text{C}$), що робить їх перспективними для використання у ракетній техніці в якості високоміцних покриттів.

Ще одним фактором, який визначає сферу використання даних матеріалів є стійкість до окислення в агресивних середовищах та на повітрі. Як вже розглядалось раніше, потенційним вирішенням цієї проблеми може стати додавання в склад сплаву SiC , що зможе значно підвищити їх корозійну

стійкість. Але вплив карбіду кремнію на дані сплави вивчений не досить комплексно, тому потрібно проводити додаткові дослідження поведінки композитів при високих температурах з різним вмістом SiC та режимами виробництва даних матеріалів.

Таким чином метою даної роботи є дослідження структури та властивостей сплавів потрібної системи B_4C-NbB_2-SiC , пошук евтектичного складу та дослідження властивостей отриманого матеріалу. Для досягнення поставленої цілі потрібно виконати наступні кроки:

а) пошук та аналіз існуючої літератури щодо композиційних матеріалів, що мають високі механічні та фізичні властивості;

б) знаходження експериментальним методом евтектичного складу заданої системи;

в) одержання та дослідження структури та механічних властивостей спрямовано закристалізованого евтектичного сплаву потрібної системи $B_4C - NbB_2-SiC$.

2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Методика отримання зразків

В процесі виконання курсової роботи було вирощено монокристалічний композит B_4C-NbB_2-SiC методом безтигельної зонної плавки.

Одержання сплавів системи B_4C-NbB_2-SiC включає в себе дозування вихідних порошків, приготування суміші, шихтування (замішування з пластифікатором) пресування стрижнів та безтигельну зонну плавку. Технологічну схему наведено на рисунку 2.1.

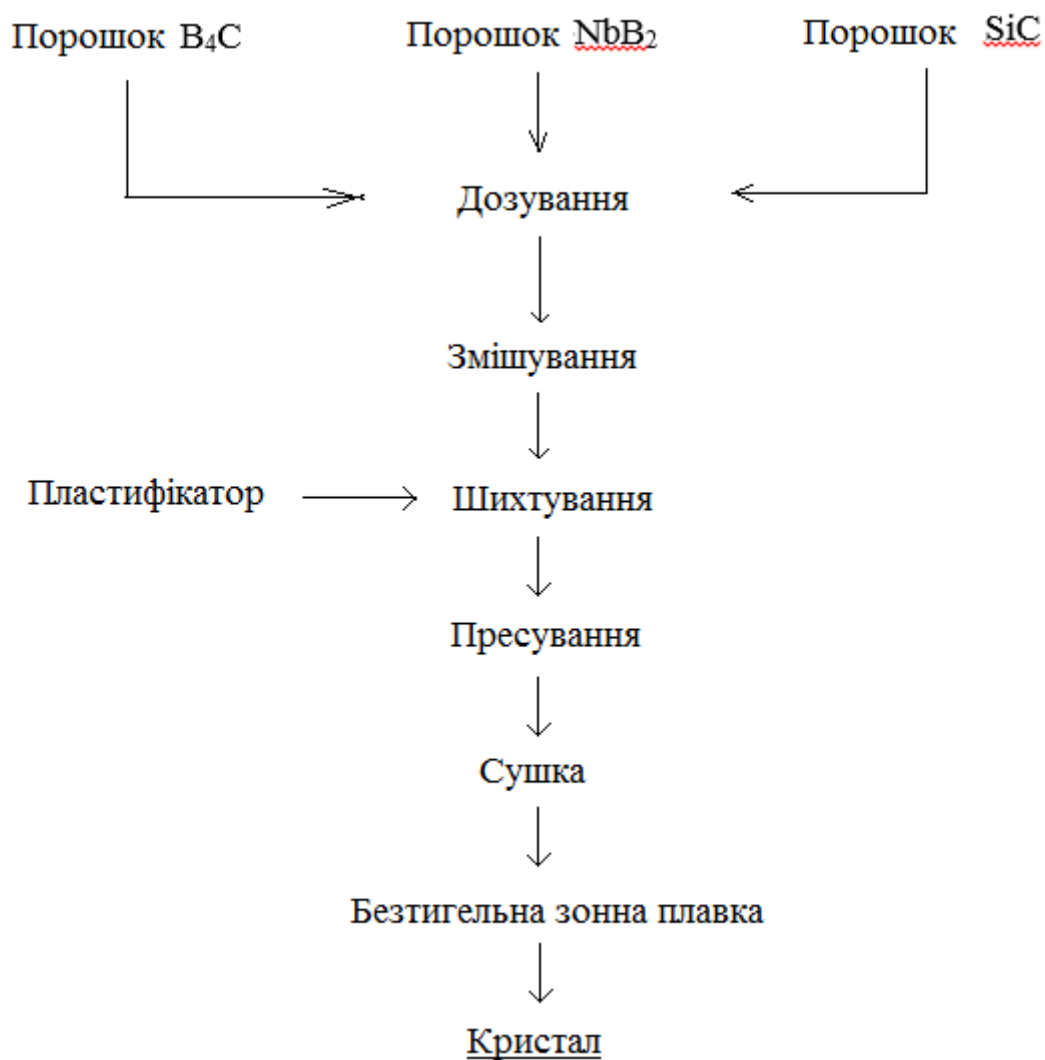


Рисунок 2.1 - Технологічна схема отримання закристалізованих сплавів B_4C-NbB_2-SiC

2.2 Вихідні матеріали

В якості вихідних матеріалів використовувались дрібнодисперсні порошки B_4C , NbB_2 та SiC . Відсотковий склад компонентів у сумішах представлений в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вміст компонентів у вихідних сумішах

Суміш B_4C - NbB_2 - SiC	Вміст компонентів, об%		
	B_4C	NbB_2	SiC
1	49	18	33
2	50	15	35
3	50	20	30

Вибір саме таких сумішей пояснюється тим що вони теоретично є наближеними до евтектичної.

2.2.1 Визначення евтектичного складу сплаву

Відомо, що за допомогою спрямованої кристалізації можна визначити точний склад евтектичного сплаву [28]. Даний метод заключається в тому, що потрібно приготувати зразок з наближеним до евтектичного складом, закристалізувати його методом зонної плавки і кількісним металографічним аналізом по характерних евтектичних ділянках у кінцевій частині вирощеного кристалу визначити точний вміст компонентів у евтектиці.

В трикомпонентній системі склад сплавів, структурних складових та фаз визначається за допомогою концентраційного трикутника. Температура відкладається по осі, яка є перпендикулярною до площини трикутника. Таким чином, для зображення потрійної системи застосовують просторову модель, що представляє собою тригранну призму (рис. 2.2) [29].

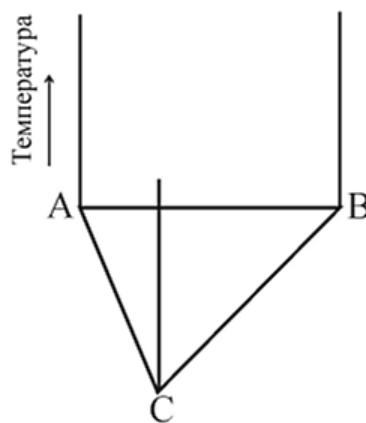


Рисунок 2.2 – Просторове зображення трикомпонентної системи

Найпростішим способом для визначення хімічного складу точки, що знаходиться всередині концентраційного трикутника є спосіб, коли з фігуративного точки X , склад якої необхідно визначити, на будь-яку зі сторін трикутника проводять лінії паралельні сторонам концентраційного трикутника (рис. 2.3). Обрана для визначення хімічного складу сторона розбивається на три відрізки, відповідних концентрації компонентів A , B і C в точці X .

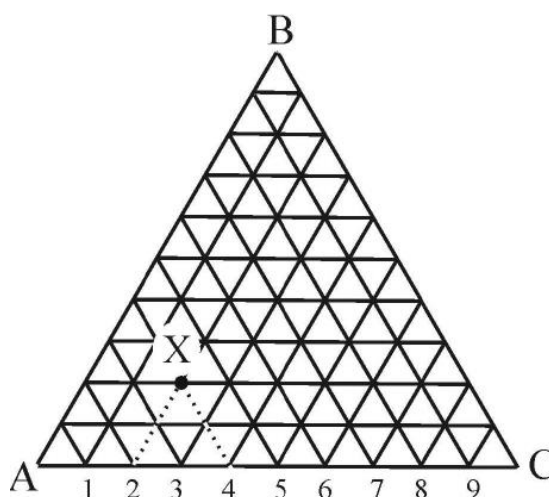


Рисунок 2.3 – Кількісне визначення хімічного складу в точці X

Після опрацювання діаграм плавкості подвійних систем B_4C-NbB_2 , NbB_2-SiC та B_4C-SiC за допомогою геометричної побудови було наближено визначено зону потрійної евтектики в системі B_4C-NbB_2-SiC (рис. 2.4).

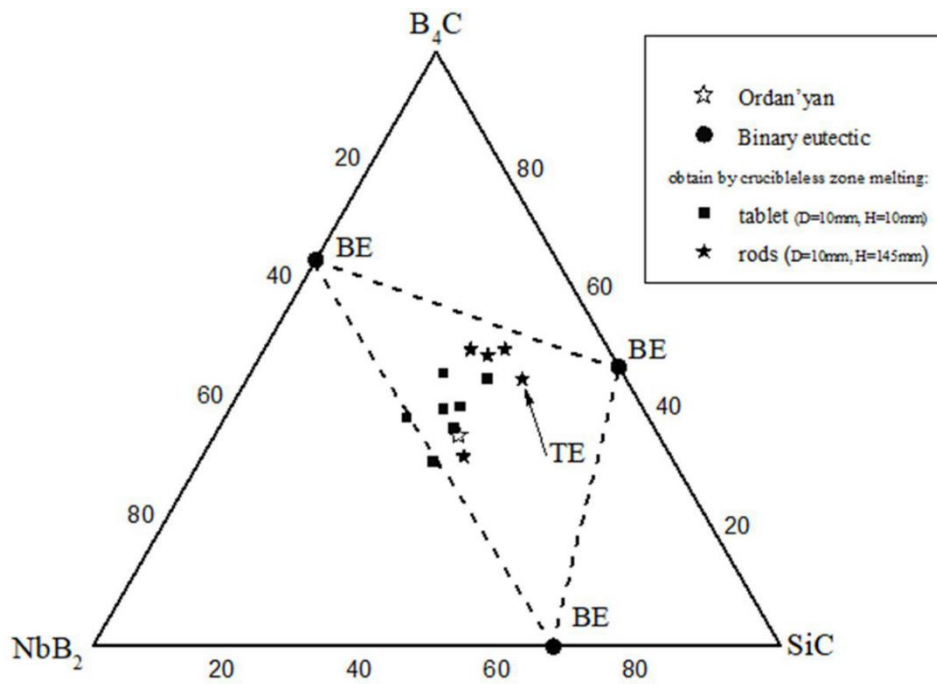


Рисунок 2.4 – Наближено визначений евтектичний склад потрійної системи B_4C - NbB_2 - SiC

Зразки з даним складом матеріалів були сплавлені на установці «Кристал – 206» та в подальшому досліджено їх мікроструктуру та механічні характеристики.

2.2.2 Одержання заготовок для вирощування кристалів

Дозування порошків проводилось на лабораторних терезах, змішування на лабораторних ситах. В якості пластифікатора вводився полівініловий спирт. Він додається в вигляді 2,5 %-вого водного розчину в кількості 20 мл на 100 гр суміші. Змішування проводилося протиранням через сито (40 мкм) 15 разів. Потім проводили грануляцію протиранням через сито (500 мкм). Розрахунок кількості порошку необхідної для пресування однієї заготовки проводився за формулою:

$$G = V \cdot p_k (1 - \Pi) \cdot K,$$

де V – об'єм пресовки (см^3);

p_k – густина компактного матеріалу (гр/см³);

Π – пористість пресовки;

K – коефіцієнт ($K=1,01$).

Об'єм пресовки визначається за формулою:

$$V = \pi h d^2 / 4$$

де d – діаметр пресовки (см);

h – довжина пресовки (см).

2.2.3 Пресування стержнів

Пресування стержнів довжиною 144 мм і діаметром 10 мм здійснюється на гідравлічному пресі в розбірній прес-формі. Після пресування стержні одержуються маломіцними, і тому потребують обережного поводження з ними. Вони розміщуються на скляних пластинках і піддаються сушці.

2.2.4 Сушка стержнів

Сушка використовується для видалення вологи із заготовок, а також підвищення їх міцності за рахунок полімеризації пластифікатора. Сушка стержнів проводилась при температурі 100 °С протягом 10 годин в вакуумній сушильній шафі.

2.2.5 Безтигельна зонна плавка

Вирощування кристалів здійснюється з допомогою безтигельної зонної плавки в установці "Кристал-206". Це індукційна установка призначена для вирощування високочистих монокристалів кремнію.

Одержані пресовані стержні закріплюються в робочій камері пічного блоку установки "Кристал-206" в затискач нижнього рухомого штоку, в аналогічний затискач верхнього рухомого штоку закріплювалася затравка, яка складалася із 2 частин: монокристалічної і полікристалічної. Після закріплення штоки приводилися в дію із ціллю підведення затравки до стержня – по можливості відстань між затравкою і не спеченою пресовкою повинна бути мінімальною. Обидва затискачі мають цангову конструкцію і виконуються з нержавіючої сталі. Зображення установки на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Конструкція установки "Кристал-206"

Після закріплення стержня камера герметизується і вакуумується до 10^{-3} Па. Плавку проводять в атмосфері інертного газу з надлишковим тиском 1 атм, що перешкоджає інтенсивному випаровуванню кристалу при температурі плавлення. Випаровування домішок і самого розплавленого матеріалу може привести до спалахування розрядів у камері. Для перешкодження цього камера заповнюється гелієм.

Після появи розплавленої зони включається рух зразка і він переміщається з встановленою швидкістю відносно індуктора. Температура кристалізації контролювалась за допомогою пірометра "Промінь". В якості затравок для

вирощування кристалів спрямовано закристалізованих евтектичних сплавів системи $\text{W}_4\text{C-NbB}_2\text{-SiC}$ використовувалася полікристалічна заготовка аналогічного складу. Це дає змогу не вводити в зону розплаву додаткові домішки.

Одержані кристали розрізались на електроерозійному станку в повздовжньому та поперечному напрямках.

2.3 Металографічні дослідження

Дослідження проводились за допомогою електронного растрового мікроскопа з камерою низького вакууму Selmi РЭМ 106 (рис. 2.6).

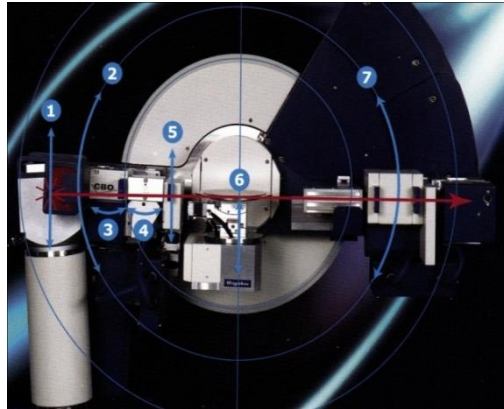


Рисунок 2.6 – Растровий електронний мікроскоп Selmi РЭМ 106

Для проведення металографічних досліджень зразки були відшліфовані за допомогою алмазного круга для того, щоб видалити всі нерівності та досягти дзеркальної поверхні, та запресовані у порошок бакеліту.

2.4 Рентгенофазовий аналіз

Для дослідження фазового складу сплавів було проведено рентгенофазовий аналіз. Дослідження фазового складу сплавів проводились на установці Rigaku Ultima IV для сплавів досліджуваних складів. Схема камери установки показана на рисунку 2.7.



1 – висота джерела; 2 – кут джерела; 3 – поперечна оптична балка; 4 – кристалооптика; 5 – висота прорізу; 6 – поверхня зразка; 7 – кут ходу детектора

Рисунок 2.7 – Схема установки Rigaku Ultima IV

Фазовий аналіз - встановлення наявності фаз в досліджуваному зразку, та проведення їх ідентифікації (якісний аналіз), визначення відсоткового вмісту фаз (кількісний аналіз)[30].

2.5 Дослідження мікротвердості та тріщиностійкості сплаву системи B_4C - NbB_2 - SiC

Перед проведенням дослідження порошки були запресовані в бакеліт та ретельно шліфувалися за допомогою алмазного круга на шліфувальному станку.

Значення мікротвердості та тріщиностійкості сплаву системи B_4C - NbB_2 - SiC визначали за допомогою мікротвердоміра MHV-1000 та оптичного мікроскопу Neophot 21. Навантаження на зразок - 9,807 Н. Час витримки становив 10 с. Формула для визначення мікротвердості:

$$H\mu = \frac{P}{F} = \frac{P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = \frac{1,854 \cdot P}{d^2}$$

де P – навантаження,

F – площа бокової поверхні відбитка,

α – кут при вершині алмазної піраміди.

Тріщиностійкість спрямовано закристалізованих сплавів вимірювалась за методикою мікроіндентування, що характеризується меншим впливом структурної неоднорідності і розраховувалась за формулою 2.2:

$$K_{Ic} = 0.016 \times \left(\frac{E}{H_v} \right)^{1/2} \left(\frac{P}{c^{1.5}} \right)$$

де c - половина довжини тріщини, що проходить через відбиток піраміди.

2.6 Випробування на триточковий згин сплавів

Міцність на згин вимірювалась триточковим випробуванням з використанням установки Deben Microtester з максимальним навантаженням 500 Н. Експерименти проводилися на повітрі при кімнатній температурі зі швидкістю навантаження 0,5 мм/хв. Нижче приведена схема навантаження зразків, яка використовувалась при дослідженні (рис. 2.8).

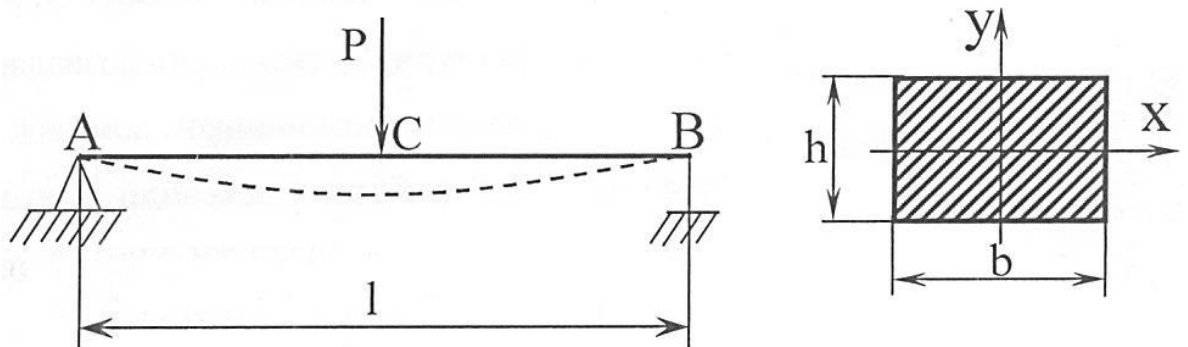


Рисунок 2.8 – Схема навантаження балки для визначення модуля пружності при статичному згинанні

Міцність на згин визначали за допомогою рівняння:

$$\sigma_u = \frac{3Pl}{2bh^2},$$

де P – осьове навантаження;

l – довжина опори;

b – товщина зразка;

h – висота зразка.

Модуль пружності визначали за формулою:

$$E = \frac{\Delta F l^3}{4bh^3 \Delta e},$$

де ΔF – зміна зусилля;

l – відстань між опорами балки;

b – товщина балки;

h – висота балки;

Δe – зміна деформації між двома точками.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Дослідження структури композитів

Дослідження мікроструктури композитів з вмістом компонентів (мол. %) B_4C -20NbB₂-30SiC, B_4C -18NbB₂-33SiC та B_4C -15NbB₂-35SiC, які були спечені методом зонної плавки показали залежність розміру та розташування зерен складових композиту від вмісту елементів. На структурі сплаву B_4C - 20NbB₂- 30SiC в площинах повздовжнього (рис. 3.1) та поперечного (рис.3.2) перерізів чітко розглядаються довгомірні зерна фази NbB₂ (білий колір), між якими знаходяться дрібні області двофазної евтектики NbB₂-SiC, що розташована у матриці з карбіду бору (темно-сірий колір). Розмір зерен бориду ніобію варіюється в інтервалі 20-40мкм, що видно на отриманих знімках. Згідно з морфологією і температурою плавлення компонентів даної системи, спочатку повинні кристалізуватися фази великих дендритів SiC, потім двофазна евтектика (NbB₂-SiC) і нарешті трифазна евтектика (B_4C -NbB₂-SiC).

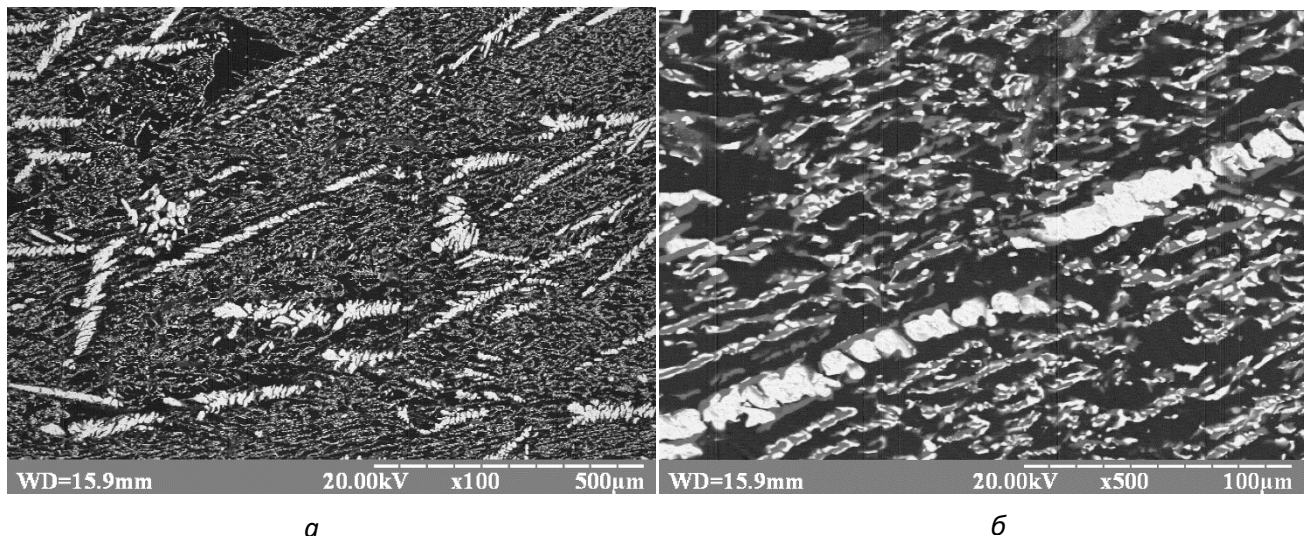


Рисунок 3.1 – Мікроструктура сплаву B_4C - 20NbB₂- 30SiC в площині повздовжнього перерізу при збільшенні: а – x100, б – x500

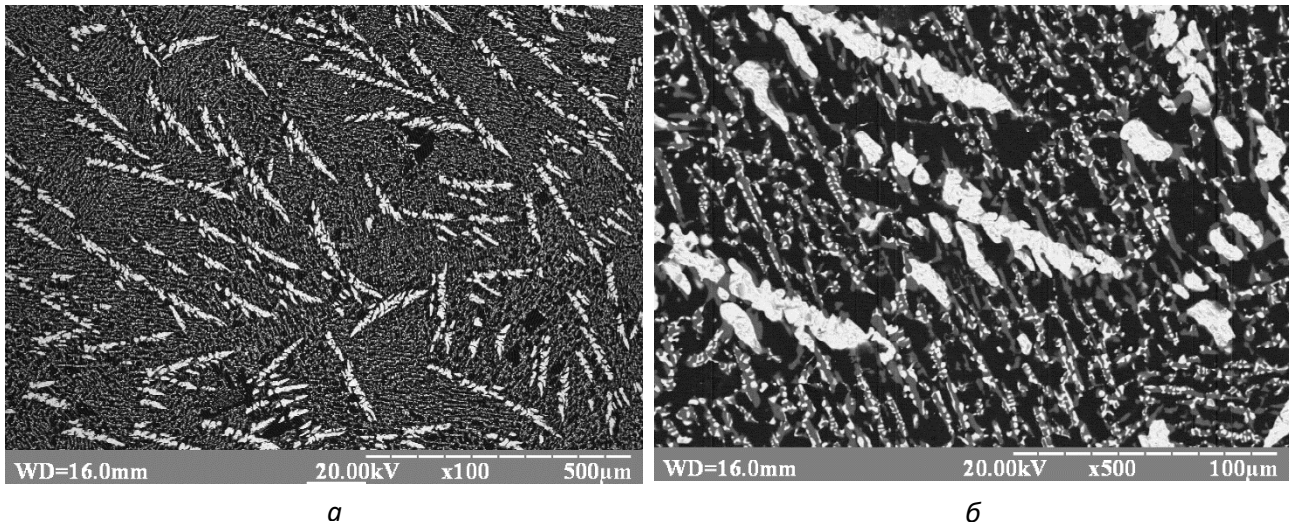


Рисунок 3.2 - Мікроструктура сплаву $B_4C-20NbB_2-30SiC$ в площині поперечного перерізу при збільшенні: а – $\times 100$, б – $\times 500$

Структура композиту $49B_4C-18NbB_2-33SiC$ характеризується рівномірним розподіленням подвійних та дрібної потрійної евтектики в центрі зразка та довгими дендритами NbB_2 по периферії як в повздовжньому перерізі (рис.3.3) так і в поперечному (рис. 3.4).

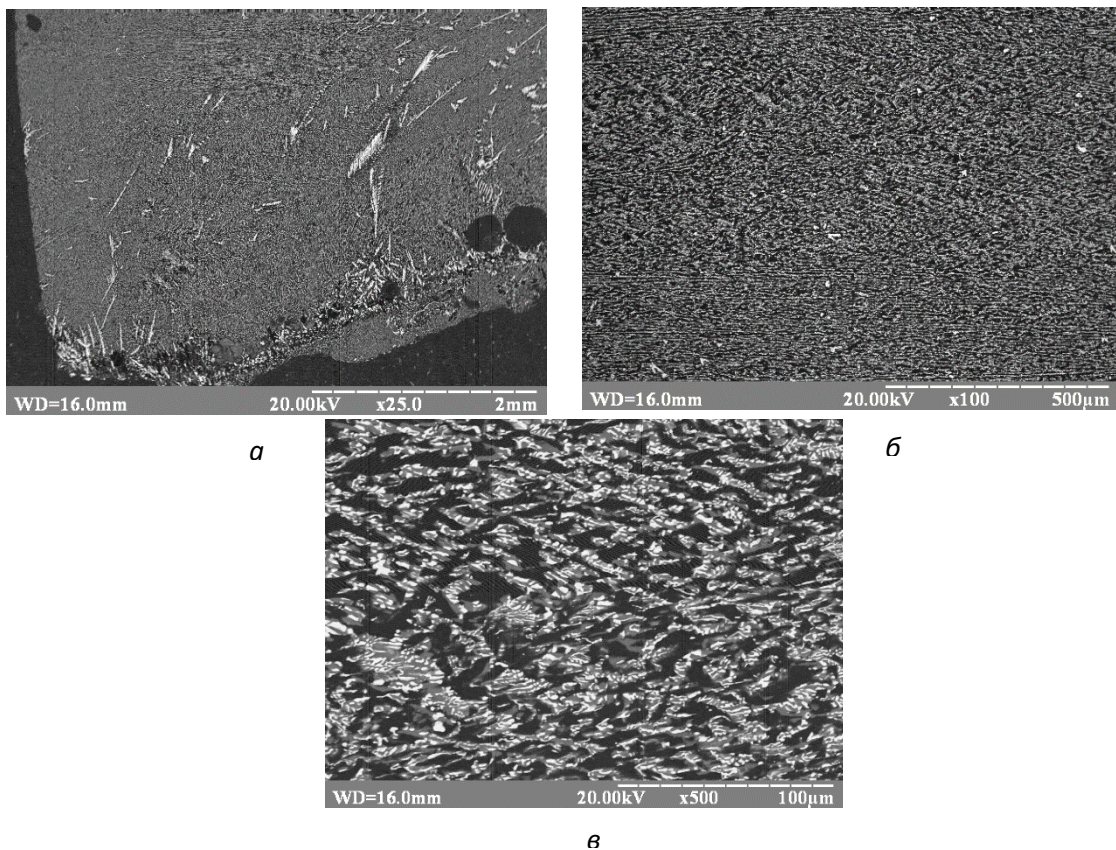


Рисунок 3.3 - Мікроструктура сплаву $49B_4C-18NbB_2-33SiC$ в площині повздовжнього перерізу при збільшенні: а – $\times 25$, б – $\times 100$, в – $\times 500$

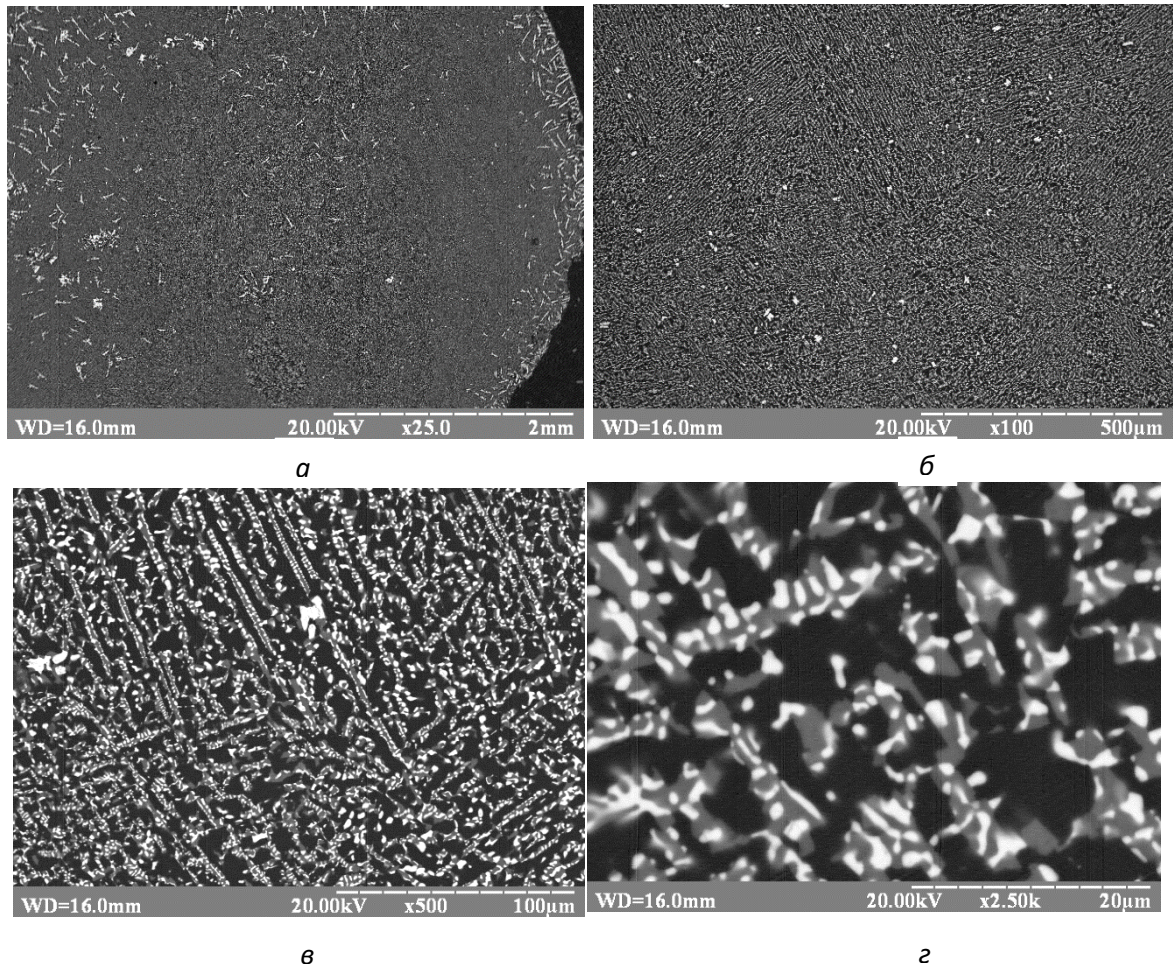


Рисунок 3. 4 - Мікроструктура сплаву $49\text{B}_4\text{C}-18\text{NbB}_2-33\text{SiC}$ в площині повздовжнього перерізу при збільшенні: а – $\times 25$, б – $\times 100$, в – $\times 500$, г – $\times 2500$

Структура композиту $50\text{B}_4\text{C} - 15\text{NbB}_2 - 35\text{SiC}$ являє собою рівновісну структуру, яка складається з дрібної потрійної евтектики від центру і до периферії зразка, відсутні дендритні включення а також нерівномірності розподілу фази по площині поздовжнього (рис. 3.5) та поперечного (рис. 3.6) перерізів. На мікроструктурі можна побачити, що в матриці B_4C (темно-сірий колір) рівномірно по всій периферії розподілені включення SiC (світло-сіра фаза) та NbB_2 (біла фаза).

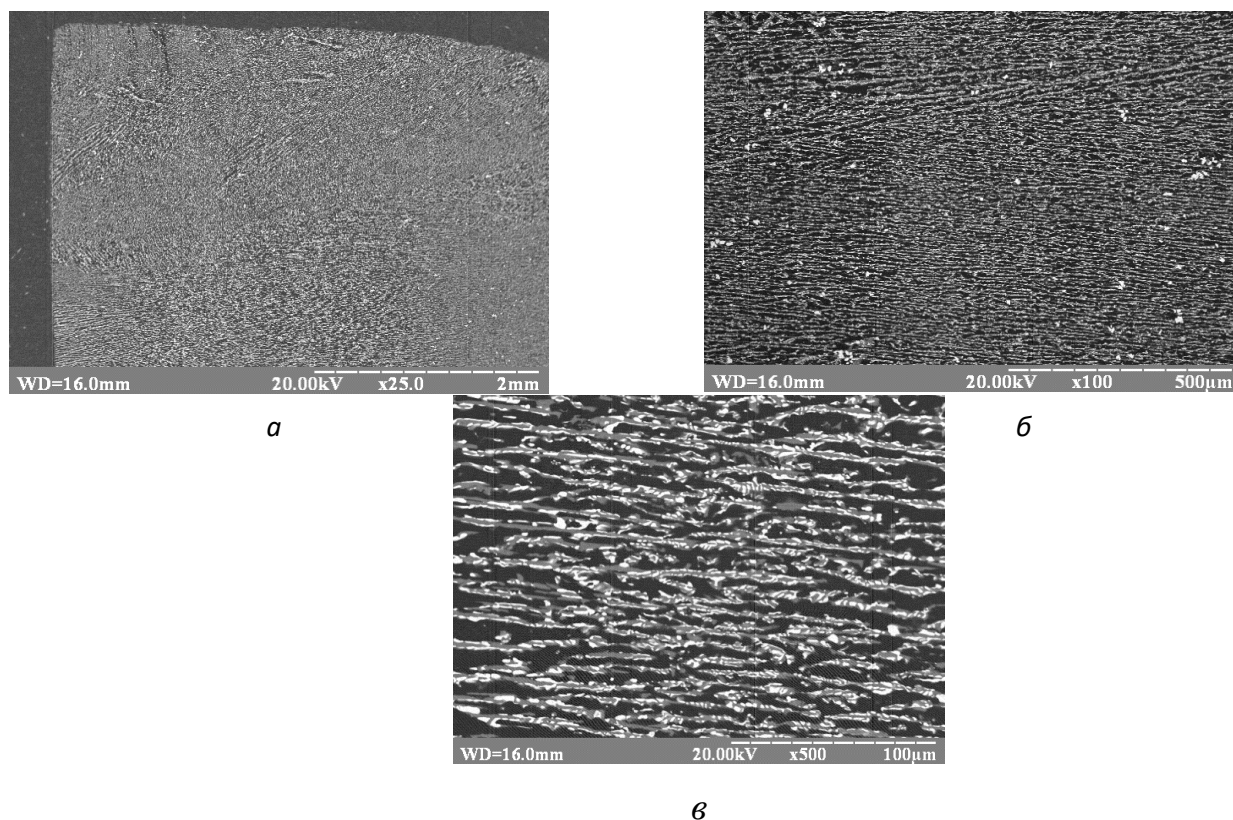


Рисунок 3.5 - Мікроструктура сплаву $50\text{B}_4\text{C} - 15\text{NbB}_2 - 35\text{SiC}$ площині повздовжнього перерізу при збільшенні: *a* – x25, *б* – x100, *в* – x500

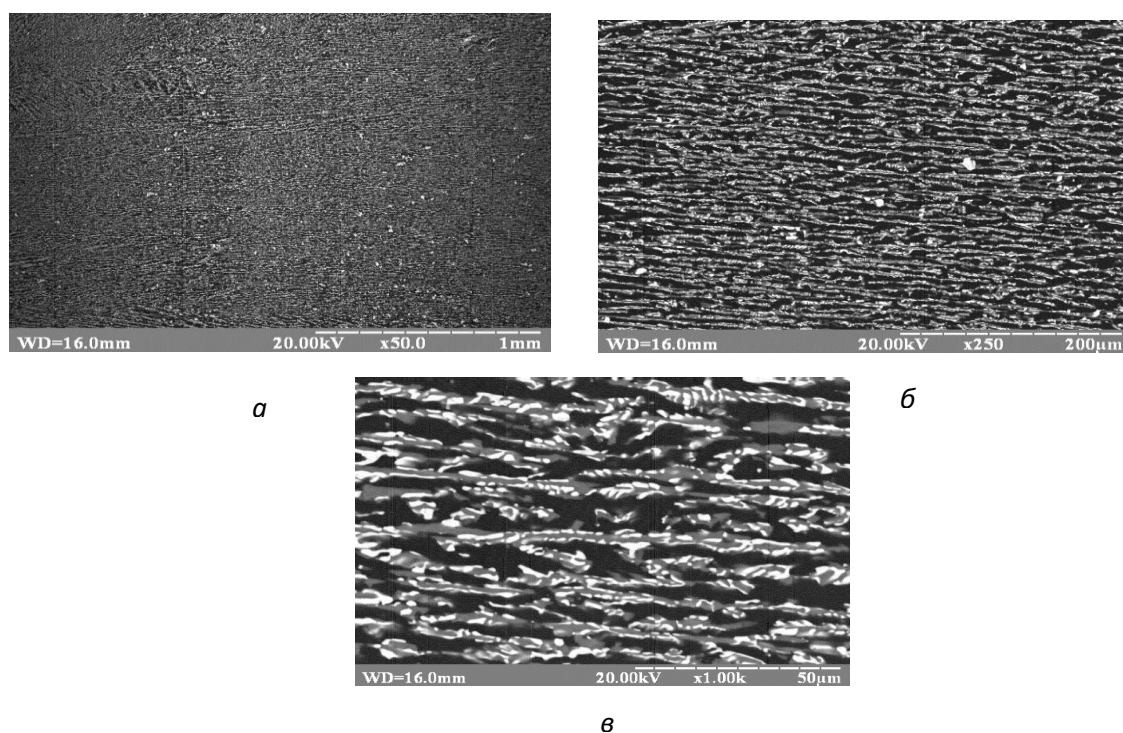


Рисунок 3.6 - Мікроструктура сплаву $50\text{B}_4\text{C} - 15\text{NbB}_2 - 35\text{SiC}$ площині поперечного перерізу при збільшенні: *a* – x50, *б* – x250, *в* – x1000

3.2 Дослідження фазового складу композитів

Для дослідження фазового складу композитів використовували метод рентгенівського фазового аналізу. Аналіз досліджуваних сплавів B_4C-NbB_2-SiC наявні всі три фази, а саме: фаза карбіду бору, фаза дібориду ніобію та фаза карбіду кремнію (рис. 3.7).

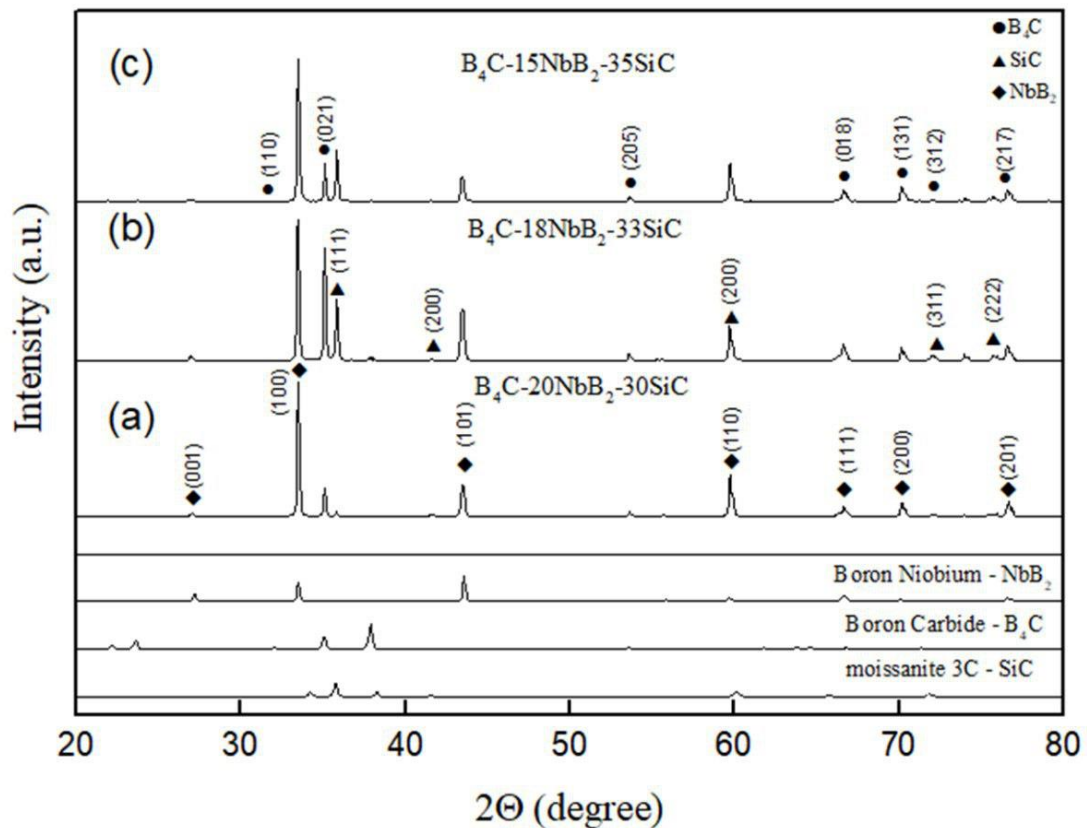


Рисунок 3.7 - Дифрактограма сплаву системи B_4C-NbB_2-SiC

3.3 Дослідження мікротвердості та тріщиностійкості

Для отримання даних мікротвердості та тріщиностійкості було проведено дослідження за допомогою мікротвердоміра MHV-1000 та оптичного мікроскопу Neophot 21 з програмним забезпеченням «Imagelab 1.0».

Експериментально визначено, що мікротвердість зменшується зі збільшенням вмісту NbB_2 та чисельно складає 35,8ГПа та 35,3ГПа для поперечного та повздовжнього перерізів відповідно для сплаву $50B_4C-15NbB_2-35SiC$, 34,8ГПа та 33,9ГПа відповідно для сплаву

49B₄C- 18NbB₂-33SiC та 30,95ГПа і 33,54ГПа відповідно для сплаву B₄C- 20NbB₂- 30SiC (рис.3.8).

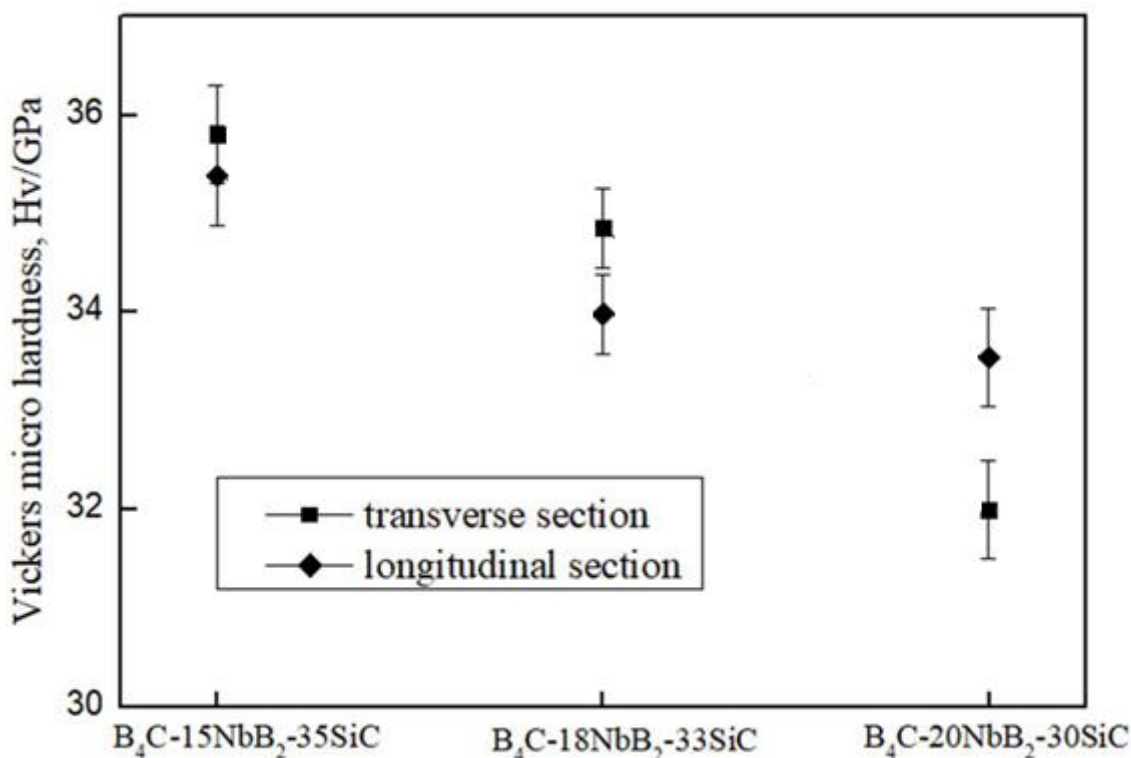


Рисунок 3.8 – Мікротвердість досліджуваних сплавів вздовж та впоперек фронту плавлення

Отримані результати можна пояснити тим, що завдяки рівномірній структурі та зменшенню розмірів включень дибориду ніобію та карбіду кремнію, а також відстані між ними призводить до збільшення мікротвердості сплаву.

Отримані значення тріщиностійкості корелюють зі значеннями твердості отриманих матеріалів. Чим дрібніша структура у сплаві тим важче розповсюджується тріщина по міжфазних границях і тим вище тріщиностійкість матеріалу. Дані тріщиностійкості по досліджуваних сплавах показані на рисунку 3.9. Мікроструктура місця поширення тріщини зображена на рисунку 3.10.

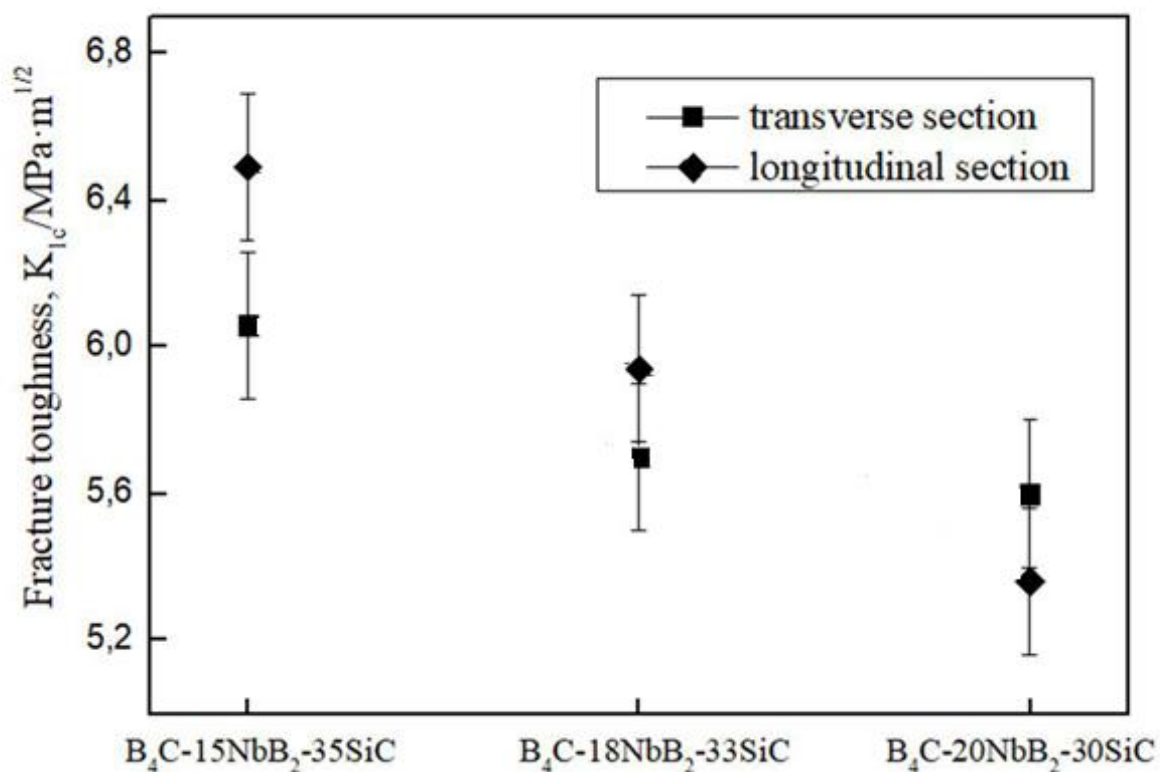


Рисунок 3.9 – Тріщиностійкість сплавів вздовж та поперек фронту плавлення

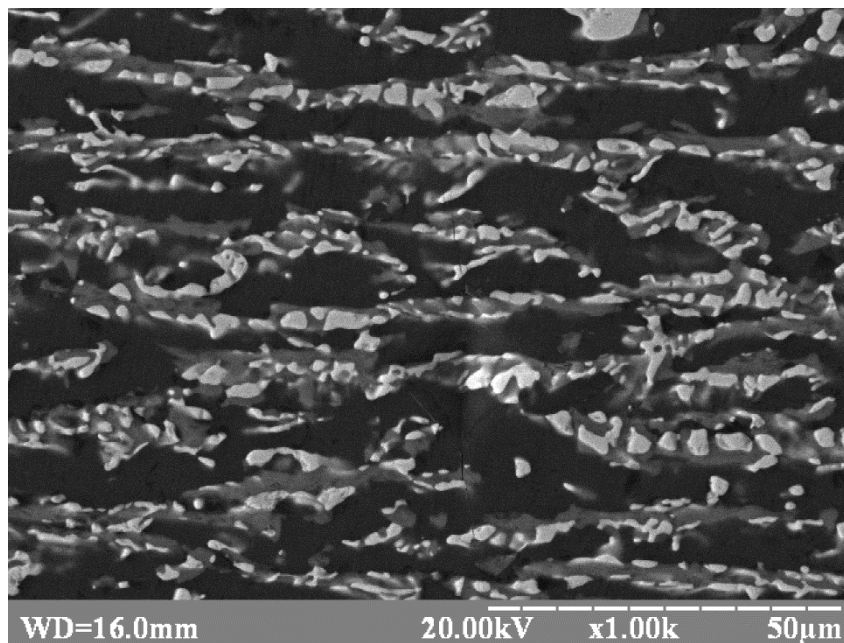


Рисунок 3.10 – Розповсюдження тріщини у сплаві $50\text{B}_4\text{C}-15\text{NbB}_2-35\text{SiC}$

Наявність у структурі включень карбиду кремнію і диборидів приводить, як правило, або до зміни напрямку руху, тобто відхилення тріщини, або до

механізму мостикування (crack bridging), або взагалі до зупинки тріщини, що, в свою чергу, сприяє підвищенню енергії руйнування і, як наслідок, підвищенню тріщиностійкості композиту.

3.4 Дослідження міцності на згин

Для одержаних сплавів $50\text{B}_4\text{C} - 15\text{NbB}_2 - 35\text{SiC}$, $49\text{B}_4\text{C} - 18\text{NbB}_2 - 33\text{SiC}$ та $\text{B}_4\text{C} - 20\text{NbB}_2 - 30\text{SiC}$ було проведено дослідження міцності на згин. Експеримент показав, що при вмісті 15_{об}% NbB_2 було отримане найвище значення міцності (313 МПа), найменше – при вмісті 20_{об}% NbB_2 (170 МПа) (рис. 3.11). Такі результати можна пояснити тим, що при вмісті 15_{об}% NbB_2 більш дрібна та рівновісна евтектична структура, в якій розмір тріщин у фазових складових значно менший, відповідно потребується значно вище напруження, для того, щоб тріщина розповсюджувалася по всій периферії зразка.

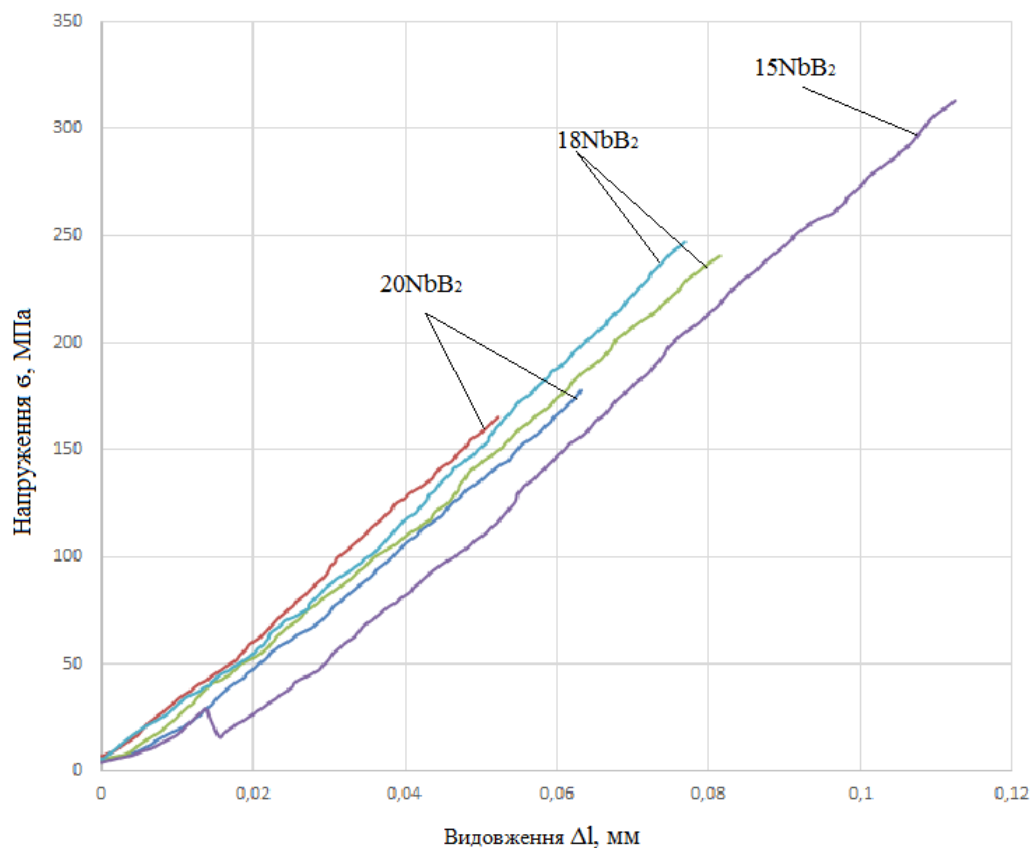


Рисунок 3.11 - Діаграма навантаження композитів $\text{B}_4\text{C} - \text{NbB}_2 - \text{SiC}$

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Розробка та виробництво сплавів, що мають в своєму складі декілька компонентів – досить трудомісткий процес, який потребує роботи з різними типами обладнання та матеріалами. У ході виконання магістерської дисертації було розроблено технологічну схему отримання трьохкомпонентного сплаву методом зонної плавки(рис. 1.3). Найбільш небезпечними етапами роботи є робота з порошками, рідинами та з установками, які живляться електричним струмом та виділяють тепло, адже під час виконання технологічних процесів можливе подразнення слизових оболонок, шкіри, а також механічні пошкодження та враження електричним струмом.

Тому важливою частиною організації даного технологічного процесу являється дотримання правил безпеки користування технологічним обладнанням та вихідними матеріалами.

Для регулювання використання виробничого обладнання та охорони праці співробітників було прийнято наказ від 28.12.2017 № 2072 Про затвердження Вимог безпеки та захисту здоров'я під час використання виробничого обладнання працівниками.

4.1 Безпечність технологічних процесів

Під час виконання даної роботи основними процесами виробництва даного композиційного матеріалу, що несуть в собі потенційну небезпеку, є:

- а) дозування порошків;
- б) підготовка шихти;
- в) пресування довгомірних заготовок;
- г) сушка зразків;
- д) спікання зразків;
- е) механічна обробка;

Дозування порошків та замішування шихти являє собою перемішування дрібнодисперсних порошкових частинок B_4C , NbB_2 та SiC , які легко осідають на

будь-яких поверхнях. Даний процес може супроводжуватись осіданням порошків на дихальних шляхах, шкірі, слизових залозах, що може привести до алергічних реакцій, кашлю, свербіння та почервоніння очей та слизової. Довга робота з даними матеріалами є неприпустима, потрібно регулярно промивати очі та шкіру після роботи з порошками.

Безпосередній контакт з порошком усувається використанням гумових рукавичок, респіратора, спеціальних захисних окулярів та одягу, що запобігає потраплянню порошків в дихальні шляхи, на шкіру та слизову оболонку.

Іншим процесом є замішування шихти. Цей процес включає в себе контакт з різними рідинами – пластифікаторами. Як розчинник для них зазвичай використовують бензин, який може викликати запаморочення, головну біль та отруєння. Для усунення цих небезпек рекомендується користуватись резиновими рукавичками та респіратором для уникнення потрапляння парів в дихальні шляхи та на шкіру. Також при роботі з пластифікаторами потрібно використовувати витяжну шафу.

Пресування заготовок – технологічний процес, що супроводжується роботою з комбінованими (з механічними та гідравлічними елементами) пресами. Основною небезпекою при роботі з ними являється те, що при високих тисках формування можливе руйнування матриці прес-форми та пуансонів. Це може привести до нанесення ушкоджень оператору преса за рахунок відскоку уламків прес-форми від робочої зони. Для уникнення таких небезпек потрібно чітко слідувати технологічній схемі, перевіряти цілісність та неушкодженість всього устаткування та використовувати захисні заслонки преса – кожухи, для того, щоб ізолювати зону, де відбувається пресування.

Сушка спресованих зразків відбувається в спеціальних сушильних шафах при температурах не вище 150°C як у вакуумі так і на повітрі, залежно від технологічного процесу. Сушильні шафи мають ізоляційну оболонку, яка унеможливорює контакт з гарячою поверхнею ззовні шафи та, відповідно, термічних опіків. Діставання заготовок з шафи відбувається з використанням вогнетривких рукавиць та спеціального щупа.

Спікання зразків методом зонної плавки відбувається за рахунок дії високих температур в невеликій області зразка. Температури можуть досягати 2000°C у зоні нагріву. Тому для уникнення цих небезпек потрібно дотримуватись правил роботи за даною установкою, використовувати захисний одяг, рукавиці та перевіряти справність та заземлення елементів установки перед роботою.

Механічна обробка матеріалів являє собою різання зразків та зачищення поверхні (шліфування та полірування). Під час різання та шліфування матеріалу можливе подрібнення та відскоки дрібних частинок від поверхні, які можуть нанести пошкодження оператору установки. Під час цих операцій оператор знаходиться на безпечній відстані від станка, що дозволяє йому контролювати процес і унеможлиблюється шанс нанесення пошкоджень.

4.2 Безпечність виробничого обладнання

Дозування та замішування вихідних матеріалів відбувається за допомогою лопаток та системи сит, через які проводиться гранулювання шихти. Для цих операцій виділяється спеціальне робоче місце, яке оснащено витяжною шафою та системою освітлення робочої поверхні. Особливої небезпеки дані операції не несуть, якщо слідувати вищесказаним інструкціям.

Гідравлічний прес RP-L023 складається з двох колон, робочої поверхні та гідравлічної системи труб, клапанів та кранів. Даний прес може розвивати тиски до 1ГПа. Захисним механізмом слугує металевий заслін, який використовують під час пресування. Оскільки прес має механічні елементи то для унеможливлення потрапляння частин одягу чи волосся до рухомих частин варто використовувати спеціальний одяг.

Перед роботою з пресом потрібно переконатись в цілісності гідравлічної та механічної системи – система труб та клапанів не повинна пропускати робочу рідину при навантаженні, колони та верхня частина пресу мають бути змащені мастилом.

Установка «Кристал - 206» використовується для отримання тугоплавких сплавів (на основі карбідів, боридів та ін.) методом зонної плавки. Процес плавки відбувається в спеціальній вакуумній камері, термічний вплив відбувається за рахунок розігріву тугоплавкого кільцевого індуктора до температур 2000 - 2200°C. Захистом від оптичного та термічного випромінювання є товстостінна оболонка робочої камери, а також спеціальне затемнене скло, яке дозволяє слідкувати за процесом без шкоди для очей. Так як джерелом живлення даної установки є струм високої потужності, то технологічно передбачена система заземлення, що унеможливорює отримання розряду струму при контакті з корпусом чи окремими елементами.

«Кристал – 206» живиться від мережі 380В, з'єднана з мережею за допомогою проводів, які підключені до розподільчої шафи. Шафа має нанесений попереджувальний символ «Обережно, висока напруга», а також захист від випадкового проникнення всередину – спеціальний замок. Також задля усунення випадкового ввімкнення установки, конструкцією шафи передбачено, що замкнути зв'язок з установкою можна лише тоді, коли дверці розподільчої шафи закриті.

Також система установки оснащена спеціальними запобіжниками, які перегорають при виведенні з ладу елементів самого агрегату і, таким чином, відбувається відімкнення всього корпусу від електричної мережі.

Установка оснащена системою водного охолодження – системою труб, які зв'язані централізовано з загальним водопостачанням. Ця система забезпечує охолодження робочої зони та відведення тепла від елементів установки. Таким чином, при аварійній зупинці чи екстреній ситуації, водопостачання не припиняється і робоча камера установки буде продовжувати охолоджуватись швидкими темпами, що дає змогу запобігти отриманню опіків оператору.

Механічна обробка зразків виконується за допомогою електро-ерозійного та шліфувального станка. Основною небезпекою при роботі з електро-ерозійним станком є ризик удару струмом високої напруги, що може виникнути в зв'язку з пробоем між ріжучою проволокою та корпусом або неправильним та непослідовним порядком роботи (вмикання та вимкнення) даної установки. Для

уникнення даної загрози потрібно перевіряти наявність заземлення та справність всіх елементів станка, а також використовувати резинові рукавички під час заміни елементів та зразків. Також конструкцією установки передбачено захист від випадкового контакту оператора з проволокою.

Основним робочим елементом шліфувального станка є алмазна шайба, яка прикручується до станини, що обертається навколо своєї осі. При роботі на шліфувальному станку є висока вірогідність розтріскування та відскоку частинок зразка від шліфувального круга, що може привезти до ушкоджень рук та обличчя. Тому під час роботи рекомендується використовувати захисний одяг, рукавиці та окуляри, щоб запобігти потраплянню частинок в очі.

Установка для дослідження фазового складу отриманого матеріалу Rigaku Ultima IV оснащена електронною гарматою та камерою, в якому проводиться дане дослідження. Основним небезпечним фактором є високоенергетичне рентгенівське випромінювання а також потужне джерело струму, яке живить електронну гармату.

Установка оснащена системою заземлення, корпус робочої камери складається з матеріалу, який повністю поглинає шкідливе рентгенівське випромінювання. Завдяки таким засобам безпеки, робота на установці не передбачає застосування спеціального обладнання так одягу. Також робоча камера оснащена системами аварійного вимкнення, яка спрацьовує автоматично при розгерметизації, пошкодженні елементів камери чи електроніки. Від перепаду напруги в установці передбачені вирівнювачі та система резервного живлення, що дає змогу завершити роботу при виникненні проблем з електромережою. Ці запобіжні заходи є повністю автоматизовані і не потребують втручання оператора.

4.3 Заходи та засоби безпеки

Перед проходженням кожної з технологічних операцій, кожен з операторів установок проходить інструктаж з роботи на установці та правил безпеки, перевіряє робоче місце, а також цілісність та неушкодженість установок

Під час розгляду технологічних операцій та обладнання для їх виконання в ході роботи над дисертацією, можна зробити висновок, що всі технологічні операції відповідають нормам, встановлених законодавством. Обладнання, на якому виконувались експерименти, має захисні елементи (кожухи, заземлення, системи аварійного вимкнення та ін.) а також попереджувальні знаки.

Робочі місця мають високий ступінь безпеки, передбачена можливість відпочинку та є спеціальні виділення місця для нагляду за обладнанням. Частина процесів повністю автоматизована. Устаткування виконане з якісних матеріалів, яке перевіряється на цілісність та неушкодженість перед кожним використанням. Технологічні процеси чітко регламентуються виконавчими інструкціями та правилами техніки безпеки, максимально знижують можливий контакт із небезпечними речовинами.

5 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

Витрати енергії для санітарно-технічних пристроїв (вентиляції, опалення) визначають у відповідності з вимогами по охороні праці та техніки безпеки.

Витрати енергії на компресійні і вакуумні установки розраховують на основі потужності встановлених у цеху пристроїв та режимах їхньої роботи.

Розрахунок витрат енергії на освітлення для кожного приміщення виконують на основі загального плану цеху. Вихідні данні для розрахунку: площа приміщення, необхідна освітлюваність і режим роботи освітлювальних пристроїв.

Витрати енергії на освітлення розраховують за формулою:

$$Q = \frac{S \times q \times \tau \times f}{1000}, \quad (5.1)$$

де S – освітлювальна площа, м²;

q – поверхнева щільність теплового потоку, Вт/м²;

τ – число годин горіння на рік;

f – коефіцієнт одночасного горіння.

Величину q зазвичай приймають: для виробничих приміщень – від 11 Вт/м² до 15 Вт/м², для побутових і службових приміщень – 10 Вт/м².

Залежно від тривалості освітлювального періоду значення τ приймають рівним: для двозмінної роботи – 2500 год., для тризмінної роботи – 4700 год.

Коефіцієнт, який враховує одночасність горіння ламп, приймають: для виробничих прогонів – 0,8; для побутових та службових приміщень – 0,7; для підвалів – 0,9.

За формулами 5.1 та 5.2 було проведено розрахунок обсягу витрат електроенергії на обладнання та освітлення виробничих приміщень, результати розрахунків витрат електроенергії зведено в таблиці 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1 – Витрати електроенергії на роботу технологічного обладнання

Найменування споживача струму	Кількість споживачів	Потужність, кВт	Фонд робочого часу на рік, год	Коефіцієнт завантаженості	Коефіцієнт одночасності	Коефіцієнт використання потужності	Річні витрати електроенергії, кВт·год
Електрична піч	1	5кВт	1000	0,5	0,6	0,7	1050
Кристал-206	1	15кВт	740	0,9	0,8	0,7	5595
Усього витрат, кВт×год							6645

Таблиця 5.2 – Витрати електроенергії на освітлення

Найменування споживача	Освітлювальна площа, м ²	Поверхнева щільність теплового потоку, Вт/м ²	Кількість годин горіння на рік, год	Коефіцієнт одночасності горіння	Річні витрати електроенергії, кВт·год
Виробнича лабораторія	54	11	2500	0,8	1190
Усього витрат, кВт×год					1190

6 ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ

6.1 Науково-технічна актуальність ДР

В світі набувають широкої популярності та використання композиційні матеріали з низькою питомою вагою та високими термічними та механічними характеристиками. Одними із таких матеріалів являються композити що мають в основі карбід бору та інші карбіди та борида. Все частіше починають розроблятись матеріали які мають в своєму складі зразу декілька тугоплавких компонентів. Завдяки таким матеріалам вдається поєднати досить великий спектр властивостей.

Матеріали на основі карбіди бору можуть знайти своє застосування у ракетній та космічній галузях завдяки своїм механічним властивостям. В поєднанні з іншими карбідами та боридами зокрема з розглянутими в даній роботі цей матеріал може значно краще працювати в агресивних середовищах а також при вищих температурах без деформації та руйнування.

Тому дослідження технології і закономірностей отримання тугоплавких композитів з низькою питомою масою є досить важливим для розвитку науки та техніки в цілому.

6.2 Мета і завдання дипломної роботи

Метою даної роботи є дослідження спрямовано закристалізованих сплавів системи B_4C-NbB_2-SiC , вивчення структури і властивостей отриманих зразків.

Для вирішення поставленої задачі необхідно виконати наступні завдання:

- провести аналіз публікацій з теми і обґрунтувати напрями досліджень;
- розробити методику проведення дослідження;
- провести формування порошкових заготовок;
- провести плавлення компактних заготовок;
- виготовити шліфи для мікроскопічних досліджень;
- дослідити мікроструктуру отриманих зразків;
- дослідити мікротвердість;

- провести рентгеноструктурний аналіз;
- обробити отримані дані та узагальнити результати.

6.3 Розрахунок планової собівартості проведення дослідження

Розрахунок усіх витрат на магістерську дисертацію, пов'язаних з виконанням даної теми, дає можливість встановити планову кошторисну вартість даної теми. Планування забезпечує зниження трудових і матеріальних витрат з метою отримання найкращих результатів за найменших витрат.

Планова собівартість визначається за наступними статтями витрат:

- заробітна плата науково-дослідницького персоналу;
- єдиний соціальний внесок;
- вартість спеціального обладнання для виконання МД;
- вартість матеріалів, необхідних для проведення МД;
- витрати на службові відрядження;
- інші прямі невраховані витрати по темі;
- накладні витрати.

6.3.1 Витрати на оплату праці

Витрати за цією статтею включають заробітну плату працівників усіх категорій, зайнятих виконанням робіт з даної теми.

Заробітна плата розраховується на основі даних про трудомісткість окремих робіт і посадових окладів виконавців цих робіт. Розрахунок ведеться в людино-днях.

При виконанні даної магістерської роботи буде задіяно такі трудові ресурси: відповідальний виконавець, старший науковий співробітник, який приймає участь в усіх етапах дослідження та здійснює безпосередній контроль, інженер дослідник відповідальний за проведення експериментів, обробку та

аналіз результатів, молодший науковий співробітник та лаборант приймають участь в дослідженні, до їх обов'язків входить забезпечення технічної бази дослідження, налаштування та допомога в експлуатації обладнання, попередній аналіз результатів, консультації.

Перелік робіт та їх трудомісткість зведено в таблицю 6.1.

Таблиця 6.1 – Розрахунок трудомісткості виконання магістерської дисертації

Етапи ДР	Трудомісткість людино-днів			
	Відповідальний виконавець, старший науковий співробітник	Молодший науковий співробітник	Інженер-дослідник	Лаборант
Підготовчий етап	6	3	5	-
Проведення експерименту	15	7	34	33
Написання записки	7	-	5	-
Оформлення, перевірка та захист	5	-	5	-
Разом	33	10	50	33

Щоденні зарплати визначаються як відношення місячного окладу до умовного місяця (для магістерської дисертації з п'ятиденним робочим тижнем складає 21,2 дня).

Перемножуючи середньоденну заробітну плату за кожною категорією виконавців на відповідну планову трудомісткість робіт, розраховується плановий фонд заробітної плати всіх виконавців.

Результати розрахунку фонду заробітної плати з теми зведено у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Розрахунок фонду заробітної плати виконавців теми

Посада	Трудовістість людино-днів	Місячний оклад, грн.	Денна заробітна плата, грн.	Сумарна заробітна плата за виконавцями, грн.
Відповідальний виконавець теми	33	11 627	548,4	18097,2
Інженер- дослідник	50	6000	283	14150
Лаборант	34	4173	196,8	6691,2
Технік	10	4873	229,9	2299
Разом				41237,4

6.3.2 Єдиний соціальний внесок

Сума єдиного соціального (V_C) визначаються у відсотках у відсотках від загального фонду заробітної плати виконавців з теми. Норматив відрахувань необхідно брати в розмірі 22% загального фонду заробітної плати.

Таким чином, єдиний соціальний внесок складе:

$$V_C = 41\,237,4 * 0,22 = 9\,072,23 \text{ грн.}$$

7 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

7.1 Витрати на матеріали, що використовуються в роботі

Витрати на матеріали, які необхідні для проведення даної магістерської, вираховуються з ціни одиниці і загальної кількості використаного матеріалу. Результати розрахунків зведені в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Вартість матеріалів, необхідних для виконання ДР

Найменування матеріалів	Стандарт	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Сума, грн.
Порошок NbB ₂		кг	0,2	2000	500
Порошок SiC			0,3	600	120
Порошок B ₄ C	ТУ 48-19-316-80	кг	0,5	450	45
Пластифікатор	-	кг	0,01	350	3,5
Разом					668,5

Транспортно-заготівельні витрати складають 10% від планової вартості використаних матеріалів, тоді загальні витрати по цій статті становлять:

$$В_{м(заг)} = 668,5 * 1,1 = 734,8 \text{ грн.}$$

7.2 Витрати на спеціальне обладнання та прилади

В роботі використовуються вже існуюче обладнання: лабораторні терези, гідравлічний прес RP-L023, установка «Кристал-206»..

Спеціальне устаткування для виконання ДР не закуповувалось.

7.3 Витрати на службові відрядження

Всі роботи проводились безпосередньо в лабораторіях Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» тому витрати на виробничо-наукові відрядження не передбачені.

7.4 Інші прямі невраховані витрати

Ця стаття поєднує в собі всі витрати на проведення магістерської дисертації, що не увійшли до попередніх статей (оплата спеціалістів з інших організацій, оплата консультацій, використання обладнання інших організацій та інше). При проведенні даної роботи інші прямі невраховані витрати складають 10% від суми врахованих витрат на МД.

$$I_B = (41\,237,4 + 9\,072,23 + 135,85) * 0,1 = 5108,5 \text{ грн.}$$

7.5 Накладні витрати

До накладних витрат (H_B) відносять:

- а) заробітна плата адміністративна – управлінського, господарського та обслуговуючого персоналу з єдиним соціальним внеском;
- б) витрати на придбання експериментального спеціального обладнання та приладів;
- в) витрати по охороні праці та на техніку безпеки;
- г) утримання та експлуатація виробничих площ, приладів, устаткування та установок;
- д) витрати на воєнізовану охорону;
- ж) інші загальногосподарські та дослідницькі витрати.

За нормативами для НТУУ «КПІ» величина накладних витрат складає 20% від суми всіх прямих витрат по темі.

$$H_B = (41\,237,4 + 9\,072,23 + 135,85 + 5044,55) * 0,20 = 11200 \text{ грн.}$$

7.6 Планова кошторисна вартість магістерської дисертації

Зроблені розрахунки дозволяють визначити загальну планову кошторисну вартість виконання ДР. Плановий кошторис витрат по темі досліджень наведено в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Планова кошторисна вартість ДР по темі

Назва статей	Умовне позначення	Сума, грн.	Сума, %	Обґрунтування
1	2	3	4	5
Заробітна плата виконавців теми	ЗП	41 237,4	61,93	За розрахунками
Єдиний соціальний внесок	В _С	9 072,23	13,62	22% від ЗП
Вартість основних матеріалів	В _М	734	0,21	За розрахунками
Вартість спец. Обладнання	В _{ОБ}	-	-	Не планується
Витрати на послуги сторонніх організацій	В _{СО}	-	-	Не планується

Продовження таблиці 7.2

1	2	3	4	5
Інші прямі невраховані витрати	I _В	5 108,5	7,7	10% від суми врахованих прямих витрат
Накладні витрати	H _В	11 200	16,54	20% від усіх прямих витрат по темі
Разом	В _{ДР}	67 352,13	100	Сума всіх попередніх статей

7.7 Економічна ефективність ДР

Розрахунок очікуваного економічного ефекту магістерської дисертації необхідний для визначення доцільності проведення даної роботи. Однак, економічний ефект може бути розрахований тільки по магістерським роботам, які безпосередньо націлені на створення нових матеріалів, покращення параметрів та якості продукції, а також створення нових конструкцій тощо.

За основний показник ефективності фундаментальних досліджень беруть науково-технічний ефект. Науково-технічний ефект $E_{нт}$ пошукових та прикладних досліджень кількісно визначають узагальненим показником, який враховує рівень часткових показників: новизну, перспективність та ступінь реалізованості наслідків дипломної роботи.

Узагальнений показник можна визначити за допомогою оцінок, виражених у балах:

$$E_{НМ} = \sum_{i=1}^3 R_i * Q_i \quad (7.1)$$

де R_j - коефіцієнт вагомості новизни (0.4), перспективності (0.2) та реалізованості наслідків НР (0.4);

Q - новизна, перспективність та реалізованість, балів.

Таблиця 7.3 – Оцінка науково-технічного ефекту ДР

Показник ДР	Характеристика результатів	Бали
Новизна	Техніко-економічні показники нової технології на галузевому рівні.	7
Перспективність	Технологія може бути впроваджена у порошковій металургії.	9
Реалізованість	Термін впровадження нової технології - до 6 - го року	8

Узагальнений показник:

$$E_{HT} = 7 * 0,4 + 9 * 0,2 + 8 * 0,4 = 7,8 \text{ балів.}$$

Розрахований показник свідчить про доцільність виконання магістерської дисертації по даній темі.

7.8 Висновки

Обґрунтована науково-технічна актуальність виконання досліджень по даній темі. Розраховано планово-кошторисну собівартість проведення ДР з урахуванням витрат всіх видів ресурсів.

Розраховано показник умовної економічної ефективності проведення роботи.

8 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

8.1 Актуальність

В останні роки великого поширення серед організацій-початківців і різних об'єднань молодих вчених набули startup-проекти (стартапи). Стартап – це тільки-но створена компанія (можливо, навіть не є ще юридичною особою), яка знаходиться на стадії розвитку і будує свій бізнес або на основі нових інноваційних ідей, або на основі технологій, які щойно з'явилися. Для стартапу характерні: обмеженість початкових інвестицій; швидкий розвиток; низькі шанси на успіх. Основним документом, що характеризує стартап, є бізнес - план – обов'язковий письмовий документ, що визначає ділові можливості та перспективи подальшого розвитку, а також роз'яснює, як ці можливості можуть бути реалізовані наявною командою.

Для задоволення потреби машинобудування, металообробки та інших галузей де необхідні матеріали для обробки, а також забезпечення економії дорогих і дефіцитних марок сталі, що застосовуються при виготовленні інструменту і деталей машин, необхідно розвивати та впроваджувати нові тверді сплави. Вони можуть забезпечити довговічність та надійність деталей машин та інструменту, що працюють в складних умовах експлуатації. Розробка та отримання твердих сплавів є дуже важливим завданням.

Останнім часом набуло поширення отримання матеріалів подібних до твердих сплавів методом спрямованої кристалізації, іскро-плазмового спікання та плакування порошків для додавання пластичної зв'язки, для подальшого спікання.

8.2 Мета і завдання стартап проекту

Метою розділу є формування інноваційного мислення, підприємницького духу та формування здатностей щодо оцінювання ринкових перспектив і можливостей комерціалізації основних науково-технічних розробок, сформованих у попередній частині магістерської дисертації у вигляді

розроблення концепції стартап-проекту в умовах висококонкурентної ринкової економіки глобалізаційних процесів.

Завдання розділу полягає в маркетинговому аналізі перспектив реалізації запропонованих магістрантом науково-технічних рішень та пропозицій, оцінювання можливостей їх ринкового впровадження.

8.3 Опис ідеї проекту

В межах підпункту слід послідовно проаналізувати певні ідеї:

- а) зміст ідеї (що пропонується);
- б) можливі напрямки застосування;
- в) основні вигоди, що може отримати користувач товару (за кожним напрямком застосування);
- г) чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників.

Таблиця 8.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Отримання спрямовано закристиалізованих евтектичних сплавів на основі карбіду бору	1) Виготовлення матеріалів для обробки інструментів	1) Дешевизна процесу; 2) Екологічна чистота процесу; 3) Покращені властивості кераміки
	2) Виготовлення зносостійких матеріалів	

8.3.1 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу необхідно провести аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару).

Таблиця 8.2 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Отримання спрямовано закристиалізованих евтектичних сплавів на основі карбіду бору	Безтигельна зонна плавка	Технологія наявна	Технологія доступна

За проведеними дослідженнями можна зробити висновок, що розробка та реалізація даної технології не завдасть жодних перешкод, адже дана технологія існує на ринку та доступна для реалізації.

8.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Сегмент споживачів: для аналізу попиту на ринку дослідження звужимо до рівня м. Києва.

Ринок споживачів – нішевий (вузький профіль – виробництва, які використовують матеріали з твердих сплавів).

Канали збуту: використовуються прямі канали збуту. Безпосередній контакт з потенційними покупцями через візити на підприємства та презентації товару. Контакт через тематичні та галузеві виставки та конференції. Збут через інтернет-ресурси (інтернет-магазин).

Взаємодія зі споживачами: особисті контакти, по телефону, електронній пошті. Застосування програм лояльності. Із потенційними споживачами – підтримка інформаційних інтернет-ресурсів: сайт проекту, блог новин проекту, виставки, конференції.

Для визначення актуальності вкладення грошових та матеріальних ресурсів на впровадження даної технології варто зрівняти діючу облікову ставку НБУ та середню норму рентабельності ринку (14 %). З 26.05.2018 р. НБУ прийняло рішення про зниження облікової ставки до 12,5 %. Таким чином, рентабельність ринку є вищою, що свідчить про те, що даний проект є привабливим для інвестування.

Визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл.8.3).

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 8.2-8.3). Фактори в таблиці подавати в порядку зменшення значущості.

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю п'яти сил М. Портера).

М. Портер вирізняє п'ять основних факторів, що впливають на привабливість вибору ринку з огляду на характер конкуренції. Це:

- а) конкурент, що вже є у галузі;
- б) потенційні конкуренти;
- в) наявність товарів-замінників;
- г) постачальники, що конкурують за ринкову владу;
- д) споживачі.

Таблиця 8.3 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Застосування зносостійких інструментів для обробки матеріалів	Виробництва, заводи	<ul style="list-style-type: none"> - Новітня техніка та технології, які застосовуються; - Швидкість та високий об'єм виготовлення продукції; - Гарантія якості; - Надійність, висока зносостійкість 	<ul style="list-style-type: none"> ●якість; ●допустима собівартість; ●надання чітких гарантій; ●швидкість виконання

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл.8.4-8.5)

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза).

Таблиця 8.4 – Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Загроза появи нових конкурентів	Нові конкуренти привносять у галузь нові виробничі потужності й прагнуть роздобути частку ринку збуту, тим самим, знижуючи позиційний прибуток	Знижує загальний потенціал прибутковості в галузі. Запекла конкуренція в галузі знижує прибутковість, тому що за те, щоб зберегти конкурентоспроможність, призводить до додаткових витрат (витрати на рекламу, організацію збуту, науково-дослідні й дослідно-конструкторські розробки (НДДКР)).
2	Обмежений ринок	Достатня кількість продукції, яка завоювала статус бренда	Скорочення обсягів продажів у результаті порушення договірних зобов'язань.
3	Слабкий рівень технічної оснащеності	Зростання кількості потребуючої продукції, в свою чергу збільшення кількості та якості технічного обладнання	- втрати дохідності бізнесу в результаті зниження рівня репутації; - скорочення обсягів виробництва в результаті використання застарілого обладнання.

Таблиця 8.5 – Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Вихід на нові ринки або сегменти ринку	Можливості розширення виробництва, збуту.	Збільшує кількість продукції, що у свою чергу призводить до розширення виробничої діяльності
2	Розвиток НДДКР	Можливість розширення якості та швидкості вихідної продукції	Нові технології сприяють зменшенню собівартості послуги, а, відповідно, і її вартості для клієнтів; збільшенню обсягів продажу; створення/видозміна послуги.
3	Високий рівень технічної оснащеності	Можливість завербування висококваліфікаційних спеціалістів. Вихід на новий більш прибутковий ринок	Збільшення якості та кількості продукції

Перелік слабких та сильних сторін та властивостей ідеї потенційної послуги є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності та новий метод плавки дає можливість при мінімальних затратах підприємства виготовляти та випускати порівняно якісну та дешеву для клієнта продукцію.

Таблиця 8.6 – SWOT-аналіз стартап-проекту (Слабкі та сильні сторони)

Сильні сторони (S):	Слабкі сторони (W):
<ul style="list-style-type: none"> ● молодий і кваліфікований колектив; ● дуже широкий асортимент послуг ● послуга дешевша наявних на ринку аналогів 	<ul style="list-style-type: none"> ● брак власного устаткування; ● додаткові транспортні витрати; ● наявність на ринку компаній, які мають своїх покупців/клієнтів, і, відповідно, добру репутацію.

Таблиця 8.7 – SWOT-аналіз стартап-проекту (Можливості та загрози)

Можливості (O):	Загрози (T):
<ul style="list-style-type: none"> ● посилення позиції на ринку; ● вихід на нові сегменти ринку; ● збільшення різноманітності у взаємозалежних продуктах; ● підвищення кваліфікації персоналу в галузі сучасних технологій, менеджменту та маркетингу. 	<ul style="list-style-type: none"> ● зростаюче конкурентний тиск; ● швидке копіювання конкурентами; ● поява нових конкурентів з товарами-замінниками; ● захоплені частки ринку іншими компаніями перешкоджають залучення клієнтів.

8.5 Розроблення ринкової стратегії проекту

Структура ринкової стратегії, тобто рішень, що визначають взаємовідносини підприємства з ринком ресурсів, багато в чому аналогічна структурі товарно-ринкової стратегії підприємства. Так само як і у випадку товарно-ринкової стратегії, мова тут йде про двох сферах стратегічних рішень: по-перше, рішень, що визначають поведінку підприємства на ринках матеріальних факторів виробництва (засобів і предметів праці); по-друге, рішень про номенклатуру, обсяги та якість придбаних і використовуваних усередині підприємства ресурсів.

Ринкова стратегія підприємства розробляється на основі досліджень і прогнозування кон'юнктури товарного ринку, вивчення покупців, вивчення товарів, конкурентів та інших елементів ринкового господарства. Найбільш поширеними стратегіями маркетингу є:

- а) проникнення на ринок;
- б) розвиток ринку;
- в) розробка товару;
- г) диверсифікація.

Спираючись на основні характеристики послуги, варто визначитись з базовою стратегією розвитку підприємництва. Оскільки дана послуга передбачає менші витрати, порівняно із схожими видами послуг, варто застосувати стратегію спеціалізації. Це є доцільним, оскільки підприємство може завоювати клієнтів як за допомогою меншої вартості наданих послуг, так і за допомогою диференціації.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 8.8).

8.6 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у таблиці 8.9 потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Методика, яку планується використовувати, є унікальною. Тому задля забезпечення її від копіювання конкурентами, можна запатентувати методику.

Таблиця 8.8 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект "першопрохідцем" на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Даний проект не є «першопрохідцем на ринку»	Компанія буде шукати нових споживачів, з розширенням продукції, компанія буде на вигідних умовах забирати споживачів у конкурентів	Компанія не буде копіювати характеристики товару, а спиратиметься лише на власні розробки	Стратегія спеціалізації

Таблиця 8.9 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
Виготовлення броні	Висока міцність, дешевизна, швидкість, якість	Новий сплав, що призведе до більшої міцності, зносостійкості; швидкість обробки.

8.7 Формування системи збуту

Аналіз системи збуту передбачає визначення ефективності кожного елемента цієї системи, оцінювання діяльності апарату працівників збуту. Аналіз витрат обігу передбачає зіставлення фактичних збутових витрат за кожним

каналом збуту і видом витрат із запланованими показниками для того, щоб виявити необґрунтовані витрати, ліквідувати затрати, що виникають у процесі руху товарів і підвищити рентабельність наявної системи збуту. Організація збуту в процесі аналізу відіграє дуже важливу роль, оскільки забезпечує зворотний зв'язок виробництва з ринком, є джерелом інформації про попит та потреби споживачів. Ось чому розробку збутової політики кладуть в основу програми аналізу як щодо кожного продукту, так і по виробничому відділенню загалом. Якщо на основі розрахунків з'ясовують, що витрати на реалізацію нового товару дуже високі й не дають змоги забезпечити необхідний рівень рентабельності, то керівництво виробничого відділення може прийняти ухвалу про недоцільність подальшої розробки та впровадження у виробництво певного товару. Фахівці-аналітики можуть не лише визначити майбутню прибутковість виробу, а й внести свої пропозиції щодо його вдосконалення і нових можливостей використання відповідних виробів у інших сферах.

При виборі програми збуту варто звернути увагу на те, що цільова аудиторія включає переважно осіб із середнім рівнем доходів. Таким чином, реклама та збут можуть збільшити витрати, які прямо чи опосередковано впливають на вартість послуги, не більше, ніж на 10 %. Зважаючи на вищевказане, каналами збуту можуть бути реклама в Інтернеті (соціальні мережі, дошки безкоштовних оголошень тощо), рекламні листівки, банери та інші відносно недорогі види реклами.

До завдань реклами відноситься, в першу чергу, інформування про відкриття підприємства, що запровадило унікальну послугу для зміцнення поверхні корпусів.

8.8 Висновки до розділу

Незважаючи на всі за і проти, розробка даного проекту є досить перспективною, оскільки сучасний ринок потребує використання більш довговічних та якісних деталей, а також деталей з вищими механічними та термо-електричними характеристиками. Дані сплави дозволять значно

підвищити міцність та зносостійкість деталей. Також вихід сплавів, які здатні працювати при високих температурах та в агресивних середовищах відразу приверне увагу користувачів.

При аналізі ринку виявлено, що бар'єром для успішного розвитку стартап проекту може стати продукція-замінники від конкурентів, а також бренд, який вони створили. Також використання конкурентами новітніх технологій може призвести до зменшення кількості користувачів. В загальному, стартап-проект має переваги над конкурентами, тому має місце до подальшої імплементації.

ВИСНОВКИ

В результаті проведеної роботи було досліджено структуру трикомпонентного композиту $\text{B}_4\text{C-NbB}_2\text{-SiC}$ та визначено оптимальний об'ємний вміст фаз у трифазній евтектиці ($50\text{B}_4\text{C} - 15\text{NbB}_2 - 30\text{SiC}$ об.%).

Структура евтектичних ділянок всіх досліджуваних зразків складається з матриці B_4C (темна фаза) з рівномірно розподілені по всьому об'єму включеннями карбіду кремнію SiC (світло сіра фаза) та дибориду ніобію NbB_2 (світла фаза).

Результати даних досліджень дають можливість одержання спрямовано закристалізованих композитів з регулярною евтектичною структурою.

Дослідження мікротвердості та тріщиностійкості для евтектичного складу сплаву показали високі значення цих характеристик (35ГПа та $6,2\text{МПа/м}^{1/2}$).

Даний матеріал, що складається з високоміцних та жаростійких компонентів та володіє високими механічними та технологічними характеристиками, має перспективу застосування в ракетній та космічній галузі, а також в бронетехніці

CONCLUSIONS

As a result of the work, the structure of the three-component B_4C - NbB_2 - SiC composite was investigated and the optimal volume content of the phases in three-phase eutectics was determined (50 B_4C - 15 NbB_2 - 30 SiC vol.%).

The structure of the eutectic sections of all the samples under study consists of a B_4C matrix (dark phase) with uniformly distributed over the volume inclusions of SiC silicon carbide (light gray phase) and NbB_2 niobium diboride (light phase).

The results of these studies make it possible to obtain directional crystallized composites with regular eutectic structure.

Studies of microhardness and fracture toughness for eutectic alloy composition showed high values of these characteristics (35 GPa and 6.2 MPa / $m^{1/2}$ respectively).

This material, which consists of high strength and heat resistant components and has high mechanical and technological characteristics, has the potential for use in rocket and space industry, as well as in armored vehicles

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Пилянкевич А. Н. Бора карбиды. Химическая энциклопедия / А. Н. Пилянкевич – под. Ред. Кнунянц И. Л. — М.:, 1988. - 623 с.
2. Becher, H. J., Thevenot, F., Infrarotspektroskopische Untersuchung des Borcarbids und seiner isotypen derivate $B_{12}O_2$, $B_{12}P_2$ und $B_{12}As_2$. / H. J. Becher, F. Thevenot // Z. Anorg. Allg. Chem., - 1974. - pp. 84-276.
3. Gogotsi, G. A. Mechanical properties and special features of the structure of materials based on boron carbide / G. A. Gogotsi, S. A. Firstov and others // Porosh. Met., 7 – 1987. – pp. 84-90.
4. Schwetz, K. A. Grellner, W., The influence of carbon on the microstructure and mechanical properties of sintered boron carbide / K. A. Schwetz, W. Grellner J. Less Common Met – 1981. – pp. 37-47.
5. Perry Dale L. Handbook of inorganic compounds / L. Perry Dale // Boca Raton: Taylor & Francis;, - 2011. – 553p.
6. Kovenskaya B. Physical properties of niobium boride phase / B. Kovenskaya // Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceram. – 1970. – pp. 415-719.
7. Mikio Iwasa, Makoto Kinoshita Hot-Pressing of Niobium Boride / Iwasa Mikio, Kinoshita Makoto // Journal of the Ceramic Association – 1980. – Vol. 87, - pp. 284-290.
8. Sairam K., Sonber J. K. Reaction spark plasma sintering of niobium diboride / K. Sairam, J. K. Sonber // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials – 2014 – Vol.43, - pp. 259-262.
9. R. B. Kotelnikov, S. N. Bashlikov, S. G. Galiakbarov, and A. I. Kashtanov, High Melting-Point Compounds / R. B. Kotelnikov and others // Metalurgiya – Moscow, - 1969.
10. Lane J.E., Carter Jr. C.H., Davis R.F., Kinetics and mechanisms of high-temperature creep in silicon carbide: III, sintered α -silicon carbide, J.E.Lane, C.H. Carter Jr., R.F. Davis // J. Am. Ceram. - 1988. - pp. 281–295.

11. Monteverde F., Scatteia L. Resistance to thermal shock and to oxidation of metal diborides – SiC ceramics for aerospace application / F. Monteverde, L. Scatteia // J. Am. Ceram. – 2007. – pp.1130-1138.
12. Jagodzinski H., Arnold H. Silicon Carbide, A High Temperature Semiconductor/ H. Jagodzinski, H. Arnold // Pergamon, New York – 1960 - pp. 136 - 145.
13. Shi XL, Xu FM, Tan Y, Wang L. Mechanical properties of hot-pressed B₄C-SiC composites. / Shi XL, Xu FM, Tan Y, Wang L. // Processing and properties of advanced ceramics and composites II, America: - 2012. – pp.189- 196.
14. Itaru Gunjishima Characterization of Directionally Solidified B₄C–SiC Composites Prepared by a Floating Zone Method / Gunjishima Itaru // Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan -2002. – p. 7.
15. Paderno V., Paderno Y., Filippov V., and Liashchenko A. Directional Crystallization of B₄C–NbB₂ and B₄C–MoB₂ Eutectic Compositions/ V. Paderno and others // J. Solid State Chem, - 2004. – p. 523.
16. Bogomol I., Badica P., Shen Y., Nishimura T., Loboda P., and Vasylykiv O. Room and High Temperature Toughening in Directionally Solidified B₄C– TiB₂ Eutectic Composites / I. Bogomol and others // J. Alloys Compd. – 2013. – p. 570.
17. Thevenot, F. Boron carbide—a comprehensive review / F. Thevenot // J. Eur. Ceram. – 1990. - Vol. 6, - pp. 205–225.
18. Ordanyan, S.S., Unrod V.I. Eutectics and their models, sintered composites, in systems of refractory materials/ S.S. Ordanyan, V.I. Unrod // Refract. Ind. Ceram. – 2005. - Vol. 46, - pp.276–281.
19. Sciti, D., Silvestroni, L., Medri, V., and Monteverde, F. Sintering and densification mechanisms of ultra-high temperature ceramics/ D. Sciti and others // Materials for Extreme Environment Applications. – 2014. - pp. 112–143.
20. Llorca J. Directionally Solidified Eutectic Ceramic Oxides / J. Llorca, V. Orera // Prog. Mater Sci. – 2006. – Vol. 51, Issue 6. – P. 711-809.
21. Quinn G. D. On the Vickers Indentation Fracture Toughness Test / G. D. Quinn, R. C. Bradt // J. Am. Ceram. Soc. – 2007. – Vol. 90, Issue 3. – P. 673-80.

22. Microstructure and Hardness Scaling in Laser-Processed B_4C - TiB_2 Eutectic Ceramics / R. M. White, J. M. Kunkle, A. V. Polotai, E. C. Dickey // J. Eur. Ceram. Soc. – 2011. – Vol. 31, Issue 7. – P. 1227-32.
23. Mechanical Properties of Melt-Grown Alumina-Yttrium Aluminum Garnet Eutectics up to 1900 K / J. Y. Pastor, J. LLorca, A. Salazar [etc.] // J. Am. Ceram. Soc. – 2005. – Vol. 88, Issue 6. – P. 1488-95.
24. Hong J. Directional Solidification of SiC - B_4C Eutectic: Growth and Some Properties / J. Hong, K. E. Spear, V. S. Stubican // Mater. Res. Bull. – 1979. – Vol. 14. – P. 775–83.
25. Gunjishima I. Characterization of Directionally Solidified B_4C - SiC Composites Prepared by a Floating Zone Method / I. Gunjishima, T. Akashi, T. Goto // Mater. Trans. – 2002. – Vol. 43, Issue 9. – P. 2309-15.
26. Sorrell C. C. Mechanical Properties of ZrC - ZrB_2 and ZrC - TiB_2 Directionally Solidified Eutectics / C. C. Sorrell, V. S. Stubican, R. C. Bradt // J. Am. Ceram. Soc. – 1986. – Vol. 69, Issue 4. – P. 317-21.
27. Opeka M. M. Oxidation-Based Materials Selection for 2000 °C + Hypersonic Aerosurfaces: Theoretical Considerations and Historical Experience / M. M. Opeka, I. G. Talmy, J. A. Zaykoski // J. Mater. Sci. – 2004. – Vol. 39. – P. 5887- 5904.
28. Эллиот Р. Управление эвтектическим затвердеванием: Пер. с англ. / Под ред. Л. С. Швиндлермана // Р. Эллиот – М. : Металлургия, 1987. – 352 с.
29. Лилеев А. С. Трехкомпонентные диаграммы фазового равновесия : Часть 1 : Методическое пособие по курсам «Фазовое равновесие и структурообразование», «Материаловедение» / А. С. Лилеев, Е. С. Малютина, В. Л. Столяров. – Москва : НИТУ МИСиС, 2010. – с. 1-21.
30. Горелик С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – М. : Изд-во «Металлургия», 1970. – 366 с.